

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RANGEL ANGELOTTI

**VARIABILIDADE DA PLUMA E DA ESTRATIFICAÇÃO
TERMO-HALINA NA DESEMBOCADURA DO COMPLEXO
ESTUARINO DE PARANAGUÁ E PLATAFORMA
CONTINENTAL ADJACENTE**

**PONTAL DO PARANÁ
2008**

RANGEL ANGELOTTI

**VARIABILIDADE DA PLUMA E DA ESTRATIFICAÇÃO
TERMO-HALINA NA DESEMBOCADURA DO COMPLEXO
ESTUARINO DE PARANAGUÁ E PLATAFORMA
CONTINENTAL ADJACENTE**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Centro de Estudos do Mar, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências: Área de Concentração: Dinâmica Costeira e Oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg

**PONTAL DO PARANÁ
2008**

A584

Angelotti, Rangel, 1979-

Variabilidade da pluma e da estratificação termo-halina na desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá e plataforma Continental adjacente / Rangel Angelotti. – Pontal do Paraná, 2008. vii, 153 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Centro de Estudos do Mar. Programa de Pós-graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

1. Oceanografia física. 2. Oceanografia dos estuários.
3. Sensoriamento remoto. I. Título. II. Maurício Almeida Noernberg.
III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551.4609



CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS

Centro de Estudos do Mar - Setor Ciências da Terra - UFPR

Avn. Beira-mar, s/nº - Pontal do Sul - Pontal do Paraná - Paraná - Brasil

Tel. (41)3455-1333 - Fax (41)3455-1105 - www.cem.ufpr.br/pgsisco - E-mail: pgsisco@ufpr.br

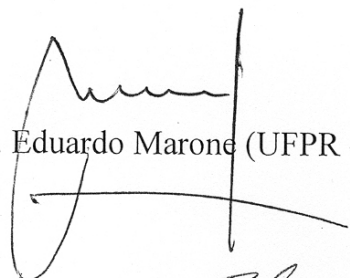
TERMO DE APROVAÇÃO

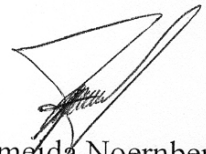
Rangel Angelotti

**“VARIABILIDADE DA PLUMA E DA ESTRATIFICAÇÃO TERMO-
HALINA NA DESEMBOCADURA DO COMPLEXO ESTUARINO DE
PARANAGUÁ E PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE”.**

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos, da Universidade Federal do
Paraná, pela Comissão formada pelos professores:


Prof. Dr. Osmar Olinto Möller Junior (FURG)


Prof. Dr. Eduardo Marone (UFPR - CEM)


Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg (UFPR - CEM)
Presidente

Pontal do Paraná, 28 de fevereiro de 2008.

**“VARIABILIDADE DA PLUMA E DA ESTRATIFICAÇÃO
TERMO-HALINA NA DESEMBOLCADURA DO COMPLEXO
ESTUARINO DE PARANAGUÁ E PLATAFORMA
CONTINENTAL ADJACENTE”**

POR

RANGEL ANGELOTTI

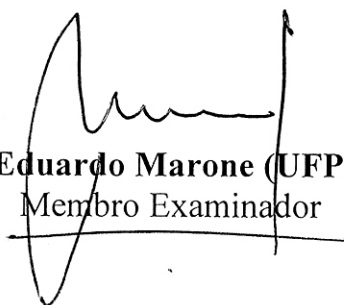
Dissertação nº 010 aprovada como requisito parcial do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:



Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg (UFPR - CEM)
Orientador e Presidente



Prof. Dr. Osmar Olinto Møller Junior (FURG)
Membro Examinador



Prof. Dr. Eduardo Marone (UFPR - CEM)
Membro Examinador

Pontal do Paraná, 28 de fevereiro de 2008.

***Dedico este trabalho à
Renata, Rubiane e Gheisa.***

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Maurício Noernberg pela orientação, amizade e apoio logístico para a realização deste trabalho.

A CAPES pela concessão da bolsa.

A todos os professores do curso, com os quais tanto aprendi.

À minha companheira Rita de Cássia e aos meus pais, Virgínia e Ruberval, por todo o amor, carinho e apoio em mais esta etapa da minha vida.

A toda a turma que me ajudou nos trabalhos de campo (e não foram poucos!), em especial aos guerreiros das saídas com nossos barcos pela plataforma, Josias, Roney e Carlos.

A todo o pessoal da Paranaguá Pilots Serviços de Praticagem por toda a atenção e inestimável colaboração que tornou possível a realização das campanhas amostrais, que de outra forma não seriam possíveis. Meu agradecimento especial ao Renato Neves, Mestre Toríbio, e Cristiane, Antonio, Chico, e todos os outros marítimos e práticos pelas conversas, histórias, piadas e causos, que faziam passar rápido as horas balançando lá fora.

A todos os amigos e companheiros do Laboratório de Física Marinha

À prof^a Eunice Machado, Liciane e demais amigos do laboratório de biogeoquímica, por me ajudarem e terem a coragem de deixar um estabonado como eu fazer minhas análises em um laboratório altamente frágil. Juro que não quebrei nada!

***'Stamos em pleno mar... Dois infinitos
Ali se estreitam num abraço insano
Azuis, dourados, plácidos, sublimes...
Qual dos dois é o céu? Qual o oceano?...***

***(...) Que importa do nauta o berço,
Donde é filho, qual seu lar?...
Ama a cadência do verso
Que lhe ensina o velho mar!
Cantai! Que a noite é divina!
Resvala o brigue à bolina
Como um golfinho veloz.
Presa ao mastro da mezena
Saudosa bandeira acena
Às vagas que deixa após.***

Castro Alves

RESUMO

Plumas são formadas quando águas menos densas, deixam o confinamento dos estuários e dispersam-se sobre as águas mais salinas e densas da plataforma. O estudo da dinâmica das plumas tem grande importância nos processos costeiros. Muitos cientistas têm realizado estudos com plumas costeiras através de diferentes técnicas metodológicas, compreendendo principalmente observações *in-situ*, estudos através de sensoriamento remoto e modelos numéricos. Este trabalho teve como objetivos analisar as variações espaço-temporais da estrutura hidrográfica ao longo de um transecto amostral sobre um gradiente termo-halino situado na interface estuário-plataforma continental interna, correlacionar a estratificação termo-halina com o regime de ventos e precipitação nos dias anteriores e determinar os padrões de dispersão horizontal da pluma estuarina sobre a plataforma continental através de imagens de satélite. Foram realizadas 31 campanhas amostrais durante o verão e inverno de 2007, onde foram realizadas medições de salinidade, temperatura, densidade, direção e intensidade de correntes e turbidez, em toda a coluna d'água, ao longo de estações posicionadas sobre um transecto de 25 km no gradiente halino entre o Complexo Estuarino de Paranaguá e a plataforma continental adjacente. Esses dados foram correlacionados com dados de maré, precipitação e ventos. Também foram utilizadas 24 imagens do sensor MODIS, que foram processadas para a obtenção da radiância emergente da superfície do mar normalizada, centrada no comprimento de onda 555 nm através do software SeaDas 5.0, permitindo um maior realce da turbidez costeira. Nas estações do interior do estuário a estratificação salina é rompida durante as marés vazantes de sizígia. Nas estações situadas na plataforma a coluna d'água torna-se misturada após a passagem de sistemas frontais, enquanto a estratificação é favorecida por ventos de direção NE. Durante o verão, verificou-se uma intrusão de uma água de fundo mais fria e salina, com características TS de mistura entre as massas Água Tropical (AT) e ACAS. Este processo de intrusão é gradativamente acentuado com ventos de quadrante nordeste, sendo interrompido com a inversão dos ventos. Foi encontrado um coeficiente de correlação (r^2) de 0.95 entre a distância da isohalina 31 *ups* em superfície a partir do início do transecto, e a pluviosidade acumulada nos seis dias anteriores. A estratificação salina nas estações estuarinas apresentam maior correlação com a maré e precipitação enquanto nas estações situadas na plataforma a estratificação tem maior correlação com a direção dos ventos. Durante o inverno a baixa salinidade nas águas da plataforma foi provavelmente causada pela presença de águas oriundas da drenagem do Rio da Prata e Lagoa dos Patos. Durante períodos de ventos do quadrante sul a pluma desloca-se para norte junto à costa, com a inversão na direção dos ventos, a pluma espalha-se sobre as águas da plataforma, de acordo com o modelo de Ekman. Através das imagens, a influência da pluma foi visível à aproximadamente 20 km da costa, estando coerente com trabalhos anteriores.

Palavras Chave: Pluma estuarina, Interação estuário-plataforma continental, Estratificação termo-halina, MODIS.

ABSTRACT

Bouyant plumes are formed when less dense waters flow off the estuaries and disperse over salty and denser shelf waters. The dynamic study of buoyant plumes have great importance in coastal processes. Many studies have been done using different methodological techniques, especially *in-situ* monitoring, remote sensing and numeric models. This work investigates the variations on the hydrographic structure of spatial and temporal parameters throughout a thermohaline gradient, located at the estuary and inner shelf boundaries, correlates the thermohaline stratification with the influence of the wind and early days precipitation data and determines the horizontal flow pattern of the estuarine buoyant plume over the upper layers of the continental shelf using satellite images. A total of 31 field campaigns were made through the summer and winter of 2007 to measure salinity, temperature, density, direction and intensity of currents and turbidity in the water column, in a 25 km length transect through the haline gradient between the Paranaguá Estuarine Complex and the adjacent continental shelf, and also correlated this measurements with tide, precipitation and wind patterns. The MODIS images were used to investigate the radiance from the sea surface, normalized and centered in 555 nm wave through the SeaDas 5.0 software, allowing a better perception of the costal turbidity. Stations located in the inner part of the estuary have the haline stratification broken during spring tides. Those located in the continental shelf have the water column mixed during a front's passage, while the stratification occurs after the persistence of winds of northeast quadrant. During summer, there was possible to notice the intrusion of a colder and salty bottom water, with TS characteristics of Tropical Water mixed with South Atlantic Central Water. This process is magnified by the winds from the northeast quadrant and can be interrupted by the inversion of this wind pattern. The Pearson's Correlation coefficient between the 31 g/kg isohaline distance, in upper layers at the beginning of the transect, and the rainfall from 6 days earlier showed a value of 0.95 (r^2). The haline stratification at the estuarine stations showed a strong correlation with tide and precipitation patterns, while those located at the inner shelf, showed a stronger correlation between the stratification and the wind direction. The low salinity of shelf waters during winter, was probably caused by the coastal water, formed by the La Plata River and the Patos lagoon. The buoyant plume is dislocated to north, close to the coast during periods with winds blowing from the south quadrant, and with the inversion of the wind pattern, the plume disperse over the upper layers of the shelf, according with Ekman's model. According to the images, the buoyant plume can reach as far as 20 km from the coast, agreeing with previous works.

Key-words: Estuarine plume, Estuary-Shelf interaction, Water stratification, MODIS.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	18
4 MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1 CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS HIDROGRÁFICOS.....	26
4.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS HIDROGRÁFICOS	28
4.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1 CLIMATOLOGIA E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS.....	33
5.2 ESTRUTURAS HIDROGRÁFICAS NO GRADIENTE HALINO.....	37
5.2.1 <i>Caracterização espacial</i>	37
5.2.1.1 Campanhas de verão	37
5.2.1.2 Campanhas de inverno.....	74
5.2.1.3 Variabilidade dos parâmetros físicos	90
5.2.1.4 Diagramas TS.....	96
5.2.1.5 Número de Froude densimétrico	97
5.3 EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS ESTRUTURAS HIDROGRÁFICAS ...	99
5.3.1 <i>Representações gráficas</i>	99
5.3.2 <i>Campanhas de verão</i>	100
5.3.3 <i>Campanhas de inverno</i>	107
5.3.4 <i>Resposta da estrutura hidrográfica às variáveis ambientais</i>	112
5.3.4.1 Influência da precipitação	113
5.3.4.2 Influência das marés e ventos	116
5.4 COMPORTAMENTO DA PLUMA SOBRE A PLATAFORMA ATRAVÉS DE IMAGENS DO SENSOR MODIS.....	119
5.5 DISPERSÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DA PLUMA DO CEP.....	132
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	137
6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	137
6.2 ESCALAS TEMPORAIS DOS PROCESSOS	138
6.2.1 <i>Variabilidade na escala de horas</i>	138
6.2.2 <i>Variabilidade na escala de dias</i>	139
6.2.3 <i>Variabilidade na escala sazonal</i>	141
6.2.4 <i>Variabilidade na escala inter-anual</i>	142
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
REFERÊNCIAS.....	144

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que os rios descarregam nos oceanos aproximadamente 10^6 m^3 de água doce por segundo (BERNER; BERNER, 1996). Esta descarga continental é de fundamental importância para a biogeoquímica dos oceanos, sendo a rota dominante de transporte de materiais dos ambientes terrestres para os marinhos (GEYER; HILL; KINEKE, 2004), desempenhando importante papel na produtividade primária, ciclo hidrológico e estabilidade termodinâmica do oceano costeiro, afetando também a distribuição de sedimentos e poluentes (MULLER-KARGER *et al.*, 2005; DZWONKOWSKI; YAN, 2005).

Apesar do volume pequeno se comparado com a quantidade de água transportada pelas correntes oceânicas, o contraste de densidade entre a água doce e salgada representa uma importante força-motriz da circulação costeira, tanto nos estuários quanto nas plataformas continentais (BROEKER, 1974¹ *apud* GEYER; HILL; KINEKE, 2004).

As águas continentais entram na plataforma em forma de plumas, podendo ser definidas como a área de influência das águas dos rios ou estuários cuja salinidade é menor do que a da água oceânica circundante (MORRIS *et al.*, 1995; PIOLA *et al.*, 2005). Localizadas na desembocadura de rios e estuários ou dispersas ao longo da plataforma continental, as plumas são feições marcantes das zonas costeiras e impossíveis de passarem despercebidas, principalmente pela diferença comum na sua coloração.

Plumas costeiras podem ser classificadas como fluviais e estuarinas. No primeiro caso, há um domínio da descarga do rio sobre os efeitos de marés resultando em uma liberação direta de água doce continental em direção ao mar. No segundo caso, os efeitos das marés dentro do estuário promovem a mistura da maior parte da água provinda da drenagem continental. Os dois tipos de plumas podem ocorrer num mesmo local dependendo das variações na amplitude da maré e vazão de água doce (MANN; LAZIER, 1991).

Também podem ser identificadas e caracterizadas como uma região de significativo gradiente de salinidade, apesar de este ser relativamente mais suave se comparado aos gradientes da região estuarina. O limite em direção ao mar de uma

¹ BROEKER, W.S. Chemical Oceanography. Harcourt Brace Jovanovich, New York, 1974. 214 pp.

pluma é de difícil definição, pois apresenta a tendência a diluir-se gradativamente às águas costeiras de salinidade reduzida. Apesar disto, uma isohalina específica, selecionada de acordo com o campo de salinidade encontrado na área de estudo pode ser uma escolha conveniente a ser considerada para propósitos práticos (JOUANNEAU; LATOUCHE, 1982). Uma característica essencial das plumas estuarinas é que, como os estuários, elas são altamente dinâmicas. Sua extensão e morfologia são dependentes da vazão dos rios, condições da maré e stress do vento (MORRIS *et al.*, 1995).

Em comparação com as regiões estuarinas, onde ocorrem intensos processos de mistura, as zonas de plumas têm recebido relativamente menor atenção. Apesar disto, o transporte de compostos químicos e as interações biogeoquímicas nestas regiões podem ser fatores-chave para a compreensão de importantes processos como a produção biológica nas zonas costeiras e o ciclo geoquímico global. A distribuição de compostos químicos naturais e poluentes de origem continental nas águas da plataforma são fortemente influenciados pela dinâmica das plumas (JOUANNEAU; LATOUCHE, 1982; FICHEZ *et al.*, 1992).

As plumas são comumente circundadas por uma estreita zona de elevados gradientes horizontais de densidade, que podem estar associados a uma marcada mudança na coloração ou na turbidez, muitas vezes com a presença de uma linha de espuma ou outros detritos. Esses limites são chamados de frentes (O'DONNELL, 1993). Uma característica da maioria dessas frentes é uma acentuada convergência no fluxo horizontal de superfície. Associados a esta convergência, ocorrem movimentos verticais, fazendo da frente uma área de pronunciada transferência vertical de *momentum* e outras propriedades (SIMPSON; JAMES, 1986). As frentes também são caracterizadas por elevada produtividade biológica e capacidade de concentrar poluentes (KRAUSE *et al.*, 1986; OLSON *et al.*, 1994).

As frentes podem ser formadas pela diferença nas características das massas d'água, tanto na parte interna dos estuários (água do rio e água estuarina) como na parte externa (água estuarina e água do mar). Também são comuns em águas rasas, separando águas estratificadas verticalmente, bem como ao longo das margens da plataforma continental, separando águas costeiras e da plataforma de águas oceânicas (NOERNBERG, 2001).

A principal diferença entre as frentes que ocorrem em mares de plataforma e as que ocorrem no sistema costeiro é a fonte de *buoyancy*, que pode ser traduzido

como “*flutuabilidade*”. O termo *buoyancy* pode ser entendido como a *capacidade de um fluido relativamente mais leve flutuar sobre outro*. Podendo ser descrito matematicamente como $b = g(\Delta_a - \Delta)/\Delta_a$, onde g é a aceleração da gravidade, Δ_a é a densidade de referência constante de 1.035 kg/m³ e Δ é a densidade da camada a ser considerada (O'DONNELL, 1993). Nas águas de plataforma, esta fonte é o aquecimento da superfície do mar, enquanto que nos estuários e zona costeira, a fonte de “*flutuabilidade*” mais importante é o aporte de água doce, resultando em pronunciada estratificação (SIMPSON; JAMES, 1986).

Na zona costeira as plumas ocorrem em uma ampla variedade de formas e escalas (GARVINE, 1995). Sob a influência da rotação da Terra, sua própria pressão e tendência de vorticidade batimétrica, as plumas tendem a aderir à costa em faixas estreitas, as quais podem ter sua escala definida pelo raio de deformação Rossby baroclínico (~ 5-15 km). Com fluxos muito rápidos (50-100cm/s), as plumas aprisionadas na costa podem se estender por mais de 100 km de suas fontes (BOICOURT, 1973² *apud* JOHNSON *et al.*, 2003). Quando os ventos são favoráveis à subsidência (ventos de direção S e SE no hemisfério sul), o jato flutuante é realçado. Quando os ventos mudam para favoráveis à ressurgência (ventos N e NE no hemisfério sul), a pluma e sua carga de materiais em suspensão é espalhado no interior da plataforma continental onde é rapidamente misturada com a água da plataforma. (RENNIE *et al.*, 1999; YANKOVSKI *et al.*, 2000; JOHNSON, *et al.*, 2001; JOHNSON *et al.*, 2003). A escala de tempo da passagem dos sistemas frontais em médias latitudes (em torno de 2 a 6 dias) faz com que o estabelecimento ao longo da costa e a dispersão da pluma seja um mecanismo extremamente eficiente para a dispersão de materiais continentais e estuarinos na plataforma (JOHNSON *et al.*, 2003).

Muitos cientistas têm realizado estudos com plumas costeiras através de diferentes técnicas metodológicas. Tais técnicas compreendem principalmente observações “*in situ*” (BROCHE *et al.*, 1998; HOEKSTRA, 1989; HOYAL *et al.*, 1999), estudos através de sensoriamento remoto (GEYER *et al.*, 2000; FROIDEFONDE *et al.*, 1998) e modelos numéricos (MOREHEAD; SYVITSKI, 1999; POULOS; COLLINS, 1994; GARVINE, 1987), sendo considerável também a abordagem utilizando mais de uma técnica (HICKEY *et al.*, 2005; GUO; VALLE-LEVINSON, 2007).

² BOICOURT, W. C. **The circulation on the continental shelf from Chesapeake Bay to Cape Hatteras**. 183 f. Ph.D. Dissertation - John Hopkins University, Baltimore, 1973.

Britter e Simpson (1978) e Simpson e Britter (1979,1980) examinaram e quantificaram os processos de mistura através de uma análise semi-empírica em uma série de simulações de laboratório e em um modelo analítico. Um diagrama esquemático das variáveis físicas usadas em seus trabalhos é mostrado na figura 1. Em seus modelos, a frente é tratada como uma região de mistura na qual flui uma camada flutuante de largura h_4 , com uma velocidade de “ultrapassagem” (relativa à frente) u_4 , a partir daí a pluma é misturada na água ambiente por intrusão vertical (“downward entrainment”).

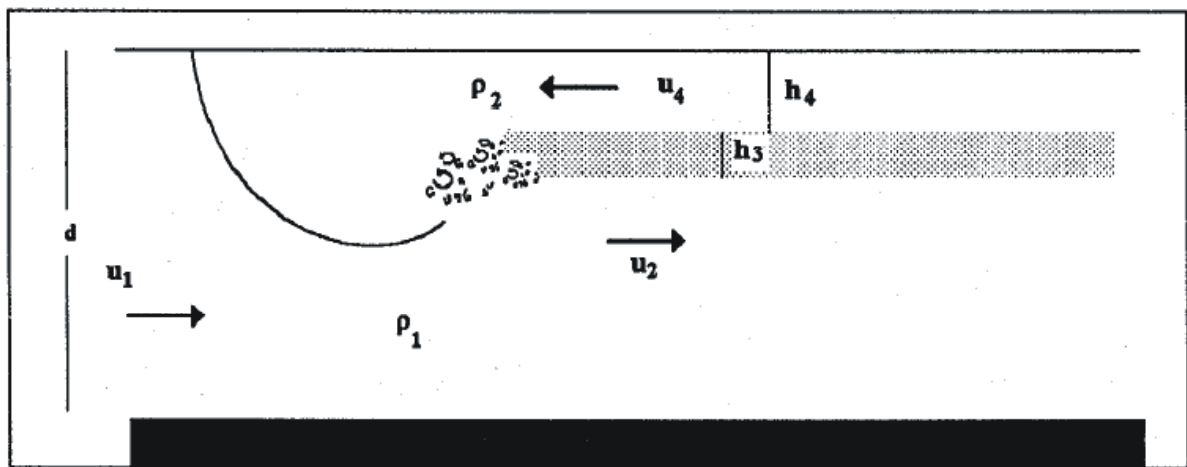


FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA PLUMA E AS VARIÁVEIS UTILIZADAS NOS MODELOS DE BRITTER E SIMPSON.

FONTE: BRITTER E SIMPSON (1978)

Usando o princípio da conservação da massa e *momentum* Simpson e Britter (*op. cit.*), derivaram uma relação algébrica entre as variáveis usando apenas o fluxo de massa, $q_m = u_4 h_4$ como um parâmetro de entrada. As observações forneceram uma estimativa do fluxo de massa normalizado $q = q_m g' / u_1^3$, onde u_1 é a velocidade frontal, $g' = g \Delta \rho / \rho$ é a gravidade reduzida, $\Delta \rho$ é a anomalia de densidade entre a pluma e a água ambiente e ρ é a densidade da água do mar. O modelo sugere que se a velocidade não dimensional da corrente de gravidade, expressa como um número de Froude, $Fr = u_1 (g' h_4)^{-1/2}$ aumentar, a mistura aumenta e a profundidade relativa da camada h_4 / h_1 (onde h_1 é a profundidade total da coluna d'água) decresce. Simpson e Britter (*op. cit.*), mostraram que a parametrização do processo de mistura pode ser simplificada pela combinação de q com Fr na forma:

$$\beta = \frac{u_4}{u_1} \equiv q Fr^2 \quad (1)$$

Resultados do modelo de Garvine (1984) sugerem que há dois locais específicos de mistura na pluma: um na frente de superfície principal e o outro no “cavado” que se forma na junção das ondas interfaciais. Garvine (*op. cit.*) descreve como as ondas interfaciais que viajam com o fluxo para fora do estuário, juntas com ondas interfaciais associadas com o estágio jovem do desenvolvimento da pluma, são refletidas pela frente principal de volta em direção à fonte. Devido ao espalhamento radial contínuo da pluma, a localização do cavado interno é advectado para trás a uma distância específica atrás da frente principal.

Pritchard e Huntley (2002), mostraram em uma comparação entre um estudo observacional e a teoria derivada de laboratório, que a magnitude da mistura na descontinuidade frontal é sensível à variação da corrente de maré vazante, que modula o fluxo de água salobra em direção à frente da pluma. Estas observações de campo indicam que a mistura na região da frente que encabeça a pluma depende da magnitude da velocidade do fluxo que sai do estuário.

A expansão de uma pluma sobre as águas costeiras depende basicamente de dois parâmetros: a diferença de densidade relativa entre a pluma e camada de água subjacente, e o número de Froude densimétrico (BOWDEN, 1983). Se não há mistura significativa das águas através da interface, a pluma vem a ficar necessariamente mais fina em sua dimensão vertical, ao mesmo tempo em que se espalha lentamente (BOWDEN, *op. cit.*).

Com relação à estrutura vertical Yankovsky e Chapman (1997) sugeriram dois casos extremos de plumas: pluma advectada à superfície e pluma advectada ao fundo. Na forma advectada ao fundo a pluma ocupa toda a coluna d'água, com o fluxo de saída da pluma em contato com o fundo. Na pluma advectada à superfície, a água sai do estuário pela camada superficial formando uma fina camada que flutua sobre uma água mais densa, permanecendo destacada do fundo.

Guo e Valle-Levinson (2007) testaram condições com e sem a influência de maré em um modelo de formação de plumas na baía de Chesapeake (EUA). Nos casos sem influência da maré a pluma se comportou como advectada à superfície, enquanto em condições com força de maré a pluma se comportou como advectada ao fundo. A influência da maré faz uma pluma mudar de advectada ao fundo para advectada à superfície. Nos casos sem maré as isohalinas aparecem inclinadas em direção à frente da pluma, similarmente ao modelo advectado à superfície proposto por Yankovsky e Chapman (1997). Nos casos com marés a salinidade se torna

verticalmente bem misturada, com a estrutura de isohalinas se apresentando de modo semelhante ao modelo de pluma advectada ao fundo.

A variação na força das correntes de maré pode transformar uma pluma de advectada ao fundo para advectada à superfície pela alteração do fluxo da descarga flutuante. Devido às correntes de maré apresentarem um ciclo de quadratura-sizígia e a descarga de água doce apresentar variações temporais, as plumas podem variar entre os dois estados. Elas tendem a se apresentar advectadas à superfície na desembocadura da baía, especialmente quando há elevada descarga de água doce em períodos de maré de quadratura (GUO; VALLE-LEVINSON, 2007).

Kirincich e Hebert (2005), em um estudo das plumas no estreito de Long Island verificaram que as velocidades das correntes de maré foram significativamente maiores quando plumas advectadas ao fundo eram observadas.

Investigações atuais sobre a dinâmica das plumas utilizam as tradicionais amostragens de campo juntamente com dados de sensoriamento remoto. Exemplos da utilização de dados orbitais para estudos da dinâmica das plumas podem ser encontrados em Nezlin e DiGiacomo (2005) e também em Dzwonkowski e Yan (2005). A utilização de dados de campo em conjunto com imagens de satélite podem ser vistos em Miller e Mckee (2004) e em Hickey *et al.* (2005). No entanto, o estudo destas feições costeiras depende de um bom conhecimento dos princípios físicos envolvidos no sensoriamento remoto e do comportamento óptico das substâncias presentes na água.

As imagens de satélite podem fornecer uma visão sinóptica e regional, permitindo uma análise mais efetiva da distribuição espaço-temporal destas plumas através de parâmetros da camada superficial do mar que podem ser medidas do espaço. Em amostragens de campo, as plumas são mais bem caracterizadas pela sua assinatura de baixa salinidade, que as diferenciam das águas circundantes. Infelizmente, a salinidade atualmente não é medida do espaço e os sensores que se planejam lançar não tem resolução espacial adequada para representar feições de pequena escala como plumas estuarinas na plataforma continental (LAGERLOEF, 2000). No entanto, satélites podem observar outras características das águas superficiais costeiras impactadas pela pluma, como a reflectância espectral medida pela “cor do mar”.

No ambiente, a água não ocorre em estado puro, mas sim como uma mistura complexa de diversos materiais dissolvidos ou particulados. De acordo com Kampel

e Novo (2005), esses materiais possuem propriedades ópticas diversas, ou seja, interagem com a luz de maneira diferente, em função de sua concentração e natureza. A presença desses componentes na coluna d'água é responsável por modificações em sua cor, pois eles absorvem ou espalham seletivamente a luz incidente. Este fato torna a cor da água uma fonte útil de informações sobre algumas propriedades químicas, físicas e biológicas de lagos, rios e oceanos.

As propriedades ópticas de corpos d'água naturais são influenciadas por várias substâncias. Três componentes principais, além da água pura são reconhecidos (IOCCG, 2000). São eles: o fitoplâncton, o material particulado em suspensão e as substâncias amarelas (também chamadas substâncias orgânicas, dissolvidas, coloridas).

Essas três categorias de componentes e, talvez, as características do fundo, podem influenciar a cor da água. O uso mais consagrado dos dados da cor do mar ocorre em estudos sobre a distribuição fitoplanctônica em águas oceânicas. Os algoritmos aplicados a dados orbitais são desenvolvidos empiricamente, ou semi-analiticamente, relacionando-se variações quantitativas na cor da água com concentrações de clorofila-*a* na camada superior do oceano. O desempenho desses algoritmos é bastante dependente do número de componentes opticamente ativos na água, de sua concentração e do modo como eles co-variam no tempo e no espaço. (KAMPEL; NOVO, 2005).

Os algoritmos mais simples empregados para estas aplicações são mais eficientes quando a concentração das outras substâncias não fitoplanctônicas no corpo d'água é baixa, ou correlacionada à do fitoplâncton, como no caso das grandes extensões oceânicas. Entretanto, deve-se admitir que tais algoritmos têm menor probabilidade de êxito em águas onde o material particulado, as substâncias amarelas, ou os efeitos do fundo exerçam maior influência (KAMPEL; NOVO, 2005). Em águas opticamente complexas relações específicas para cada região são geralmente desenvolvidas (HELLWEGGER, *et al.*, 2004).

Neste sentido cabe mencionar o conceito de águas do Caso 1 e do Caso 2. As águas onde fitoplâncton (e todo material de origem biológica covariante com ele) é o principal agente responsável por variações nas propriedades ópticas da água, são chamadas águas do Caso 1. Por outro lado, as águas do Caso 2, são influenciadas não somente pelo fitoplâncton, mas também por outras substâncias opticamente ativas, que variam independentemente, as partículas inorgânicas em

suspensão e notadamente as substâncias amarelas. (MOREL; PRIEUR, 1977; GORDON; MOREL, 1983; SATHYENDRANATH; MOREL, 1983).

De fato, observações feitas por satélite das propriedades ópticas das águas costeiras podem ser usadas para distinguir a água da pluma das águas circundantes, baseando-se na alta concentração de material em suspensão presente nas plumas (MERTES *et al.*, 1998; IOCCG, 2000; MERTES; WARRICK, 2001; NEZLIN; DiGIACOMO 2005).

Apesar disto, uma rotina no uso do sensoriamento remoto para monitorar a dinâmica de sedimentos tem sido limitada por diversos fatores. A resolução espacial e temporal dos dados orbitais e os custos das imagens e softwares de processamento são as limitações mais comuns, além é claro, da cobertura de nuvens. Por exemplo, o sensor Sea-viewing Wide Field-of-view sensor (SeaWiFS) tem uma resolução espacial de 1 km. Apesar de adequado para abordagens de meso e larga escalas, estes dados não tem detalhamento suficiente para estudos de gradientes horizontais em zonas costeiras. Em contraste, o sensor ETM+ a bordo do satélite Landsat 7 tem uma resolução espacial de 30m, mas as características orbitais do satélite fazem com que seu tempo de re-visita seja de 16 dias, não abrangendo portanto, a dinâmica temporal das águas costeiras. Os softwares de processamento de imagens até pouco tempo atrás eram caros e necessitavam de recursos computacionais também de custo elevado, o que acabou restringindo a disseminação do uso do sensoriamento remoto no estudo das zonas costeiras. Recentes e significativos avanços na análise de dados de sensoriamento remoto têm facilitado seu uso por uma ampla gama de usuários, antes restrita às tradicionais equipes de cientistas que trabalham com o desenvolvimento desses sistemas. Um bom exemplo é o projeto Earth Observing System (EOS) da National Aeronautics and Space Administration (NASA), agência espacial americana, o qual consiste de um conjunto de satélites, instrumentos sensores, softwares de processamento e sistemas de distribuição de dados. O projeto EOS disponibiliza gratuitamente, por seu portal na Internet, os dados do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), incluindo o software de processamento SeaWiFS Data Analysis System (SeaDAS), contendo algoritmos robustos para correções atmosféricas e processamento das imagens.

Autores como Nezlin e DiGiacomo (2005) e Dzwonkowski e Yan (2005) descrevem as dificuldades em se relacionar a dimensão e a persistência das feições

de plumas na Califórnia e baía de Chesapeake – EUA, respectivamente, com os eventos meteorológicos e hidrológicos por não terem conhecimento sobre, por exemplo, o quanto da precipitação influencia a formação das plumas e o quanto fica retido no continente; como se dá a dispersão geral dos poluentes; qual o papel dos pequenos rios na circulação costeira; ou qual a importância das marés na dispersão do material, o que envolve ainda a interação desses ciclos com a topografia local. Segundo Freitas (2007) os estudos na costa sul brasileira esbarram nas mesmas limitações.

No Brasil poucos estudos foram realizados sobre plumas costeiras. Os primeiros estudos foram na foz do rio Amazonas, avaliando a dispersão espacial da pluma através de vários perfis que se estendiam por mais de 300 km em direção ao mar (GEYER *et al.*, 1991). Através de um estudo da produção fitoplanctônica e bacteriana da pluma costeira da Lagoa dos Patos – RS, Abreu *et al.* (1995) observaram um forte gradiente crescente de salinidade na superfície em direção ao oceano. Schettini *et al.* (1998) estudaram a pluma do estuário do rio Itajaí-açu em um período de alta descarga de água doce, enfatizando-se aspectos ecológicos e oceanográficos.

No litoral do Paraná, Noernberg (2001) utilizando uma imagem LANDSAT 7 ETM+, identificou na plataforma continental paranaense processos de ressuspensão de sedimentos e circulação costeira, delimitando também a pluma do complexo estuarino da baía de Paranaguá e alguns de seus processos de dispersão. O autor afirma que para a condição climática analisada, a influência da pluma chega a 25 km da desembocadura. Posteriormente Natividade (2006) encontrou importantes relações entre a descarga da baía de Paranaguá e o rendimento da captura de camarões pelos pescadores na plataforma interna paranaense.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho objetiva descrever e analisar a dinâmica da pluma do complexo estuarino da baía de Paranaguá sobre a plataforma continental interna paranaense em diferentes condições ambientais

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar as variações espaço-temporais da estrutura hidrográfica vertical ao longo de um transecto amostral sobre um gradiente termo-halino situado na interface estuário-plataforma continental interna

Analisar a resposta da estrutura hidrográfica às diferentes condições de maré, ventos e precipitação.

Correlacionar a estratificação termo-halina com o regime de ventos e precipitação nos dias anteriores

Determinar os padrões de dispersão horizontal da pluma estuarina sobre a plataforma continental através de imagens do sensor MODIS.

Identificar as principais escalas temporais em que ocorre a variabilidade da pluma estuarina.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Litoral do Paraná está situado na plataforma continental sudeste brasileira, na região conhecida como “Embaçamento Sul Brasileiro” (ou em inglês *South Brazilian Bight* – denominação utilizada na literatura para se referir à forma convexa deste setor da costa brasileira), que se estende entre Cabo Frio (RJ) e o cabo de Santa Marta (SC) (CASTRO *et al.*, 2005) (FIGURA 2).

Nesta região a plataforma continental apresenta-se bastante extensa, com o início do talude continental à cerca de 200 km da costa na latitude da cidade de Paranaguá-PR (MATSURA, 1986; ANGULO, 1992).

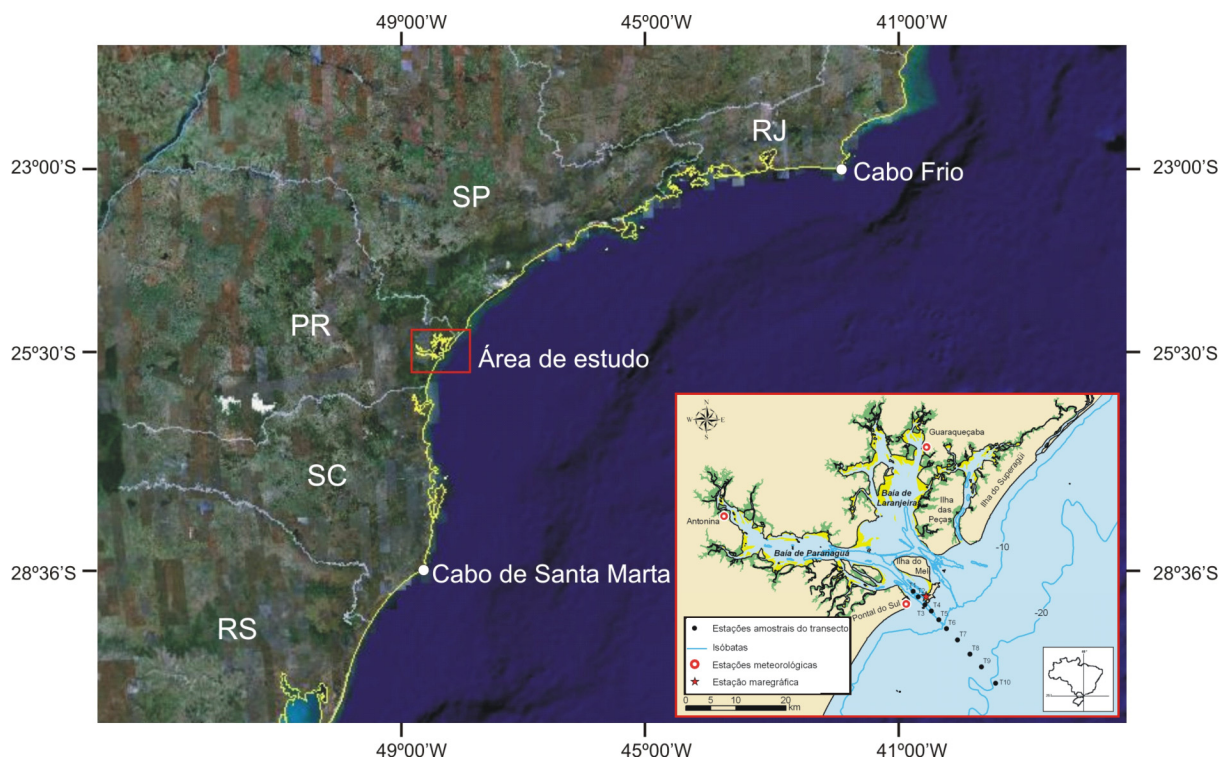


FIGURA 2 – EMBAIAMENTO SUL BRASILEIRO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

FONTE: GOOGLE MAPS E DADOS DO AUTOR (2008)

A climatologia da região e a circulação na plataforma são regidas pela atuação de dois sistemas de meso-escala: o Anticiclone Tropical (também chamado de Alta do Atlântico Sul) e o Anticiclone Migratório Polar. Os ventos de direções NE e E que ocorrem na plataforma continental sudeste estão associados à ação do Anticiclone Tropical, e as correntes marinhas geradas por estes ventos sobre a plataforma tem direção predominante para sul (CASTRO, *et al.* 2005). A ocorrência de sistemas frontais na região está associada à trajetória do Anticiclone Migratório

Polar, que se propaga em direção N e NE (QUADROS, 2002). Durante estes eventos meteorológicos, os ventos de direção sul podem tornar-se fortes e persistentes o suficiente para inverter a circulação na plataforma, forçando as correntes em direção nordeste (CASTRO *et al.*, 2005). Durante o verão as passagens das frentes frias são menos freqüentes, fazendo com que as correntes geradas pelo vento sejam predominantemente de direção sul. (SOARES, 2003).

Com relação à circulação a plataforma continental sudeste pode ser separada em três regiões de acordo com a combinação das forçantes. (CASTRO,1996). As correntes na plataforma externa estão associadas ao fluxo em direção ao sul da corrente do Brasil. A circulação na região mediana da plataforma é principalmente gerada pelo vento, mudando de direção sul para norte durante a passagem de sistemas frontais. Na plataforma interna, devido à considerável quantidade de desembocaduras de estuários existentes, o gradiente de pressão baroclínico próximo à costa força as correntes em sentido norte, efeito amplificado durante o inverno pela passagem de sistemas frontais. Essa direção predominante nas correntes pode ser invertida pela ação persistente do Anticiclone Tropical com seus ventos de direção E e NE. (CASTRO *et al.*, 2005).

De acordo com a classificação de Emilsson (1961), Brandini (1990) distinguiu, através dos intervalos termo-halinos, as principais massas d'água presentes na plataforma continental sudeste brasileira. Água Tropical (AT): com temperaturas maiores que 20°C e salinidades maiores que 36 g/kg. Água Central do Atlântico Sul (ACAS): com temperaturas entre 10 e 20°C e salinidades entre 35 e 36 g/kg. Água Costeira (AC): com temperaturas maiores que 15°C e salinidades menores que 35 g/kg. Água de Plataforma (AP): com temperaturas maiores que 20°C e salinidades entre 35 e 36 g/kg.

Segundo Brandini (1988) a água tropical (AT) ocorre paralelamente à borda do talude continental e praticamente domina toda a região oceânica fora da plataforma. Origina-se na região equatorial sendo pobre em nutrientes. É transportada pela corrente do Brasil na direção sul/sudoeste. A presença de AT sobre a plataforma continental pode estar associada ao processo de meandramento e formação de vórtices da Corrente do Brasil (CASTRO, *et al.* 2005).

A Água Costeira (AC), como o nome sugere, é encontrada próxima à costa e apresenta grande variabilidade temporal nos pares termo-halinos, sendo afetada

pela drenagem continental e pela climatologia local. A mistura da Água Costeira (AC) com a Água Tropical (AT) origina a água de plataforma (BRANDINI, 1988).

A ACAS é formada quando a Corrente do Brasil, fluindo em direção ao sul e carregando a água tropical das regiões equatoriais, encontra as águas frias da Corrente das Malvinas que fluem em sentido norte, formando assim a Convergência Subtropical do Atlântico Sul entre o Uruguai e a Argentina. Nesta região de mistura as águas subantárticas mais densas, sofrem subsidência e entram na circulação de sub-superfície do giro subtropical do Atlântico, alcançando as regiões *off-shore* do sul e sudeste do Brasil por baixo da corrente do Brasil com o nome de ACAS (DEACON, 1933³; SVERDRUP⁴ *et al.*, 1942 *apud* BRANDINI, 1990; EMILSSON, 1961; MATSUURA, 1986).

Segundo Brandini *et al.* (no prelo) dois processos importantes para a fertilização da zona eufótica da plataforma por nutrientes são gerados pela ação dos ventos. 1) a intrusão pelas camadas de fundo da ACAS fria e rica em nutrientes durante o verão e 2) a presença da Frente Subtropical de Plataforma (FSTP) descrita por Piola *et al.* (2000), que domina as áreas internas e medianas da plataforma durante o inverno.

Durante o verão, o padrão de ventos de nordeste empurra as águas superficiais da plataforma em direção ao mar aberto seguindo o modelo de transporte de Ekman (CASTRO *et al.* 2005). Este efeito é compensado pela intrusão da ACAS pela camada de fundo, o que causa uma forte estratificação termal durante o verão, realçada ainda pelo aumento da radiação solar na superfície (BRANDINI *et al.*, no prelo). Este processo de ressurgência é interrompido quando a direção dos ventos inverte-se para sul durante a passagem de sistemas frontais (CASTRO *et al.* 2005). Devido à grande quantidade de nutrientes, quando a ACAS alcança a zona eufótica ocorre um grande *bloom* de produtores primários, formando um máximo sub-superficial de clorofila na base da termoclina (CASTRO *et al.* 2005).

A FSTP é causada pela persistência dos ventos de direção sul durante o inverno, os quais empurram, em sentido norte, grandes quantidades de águas de plataforma, combinadas com a descarga rica em nutrientes dos estuários do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos. A FSTP é caracterizada por suas baixas salinidades e

³ DEACON, G.E.R. A general account of the hydrology of the South Atlantic Ocean. **Discovery Reports**. n. 7, p. 171–238, 1933.

⁴ SVERDRUP, H. V.; JOHNSON, M. W.; FLEMING, R. H. **The oceans, their Physics, Chemistry and General Biology**. New York: Prentice –Hall, 1942, 1087p.

temperaturas além de alta turbidez. (PIOLA *et al.*, 2000). Porém, segundo Möller (Com. Pess.) a FSTP é uma região de frente que separa estas águas costeiras, principalmente água do Rio da Prata e da lagoa dos Patos da água tropical e não ocorre nesta região, sendo que as águas de baixa salinidade encontradas na plataforma continental interna paranaense são águas costeiras formadas pela contribuição de todas as desembocaduras situadas ao sul da área e não particularmente a FSTP.

A plataforma continental em frente ao estado do Paraná é coberta em sua maior parte por areias, lamas e argilas de origem continental e fluvial (MATSUURA, 1986; ANGULO 1992). Nas áreas mais rasas os depósitos de sedimentos finos são provenientes dos estuários da Baía de Guaratuba, Complexo estuarino da Baía de Paranaguá e foz do Rio Ararapira (MIHÁLY; ANGULO, 2002). Entre os estuários de Paranaguá e de Guaratuba, os sedimentos são compostos predominantemente de areias finas (VEIGA *et al.*, 2005).

Veiga *et al.* (2003) em levantamentos das velocidades e direções das correntes, com um Acoustic Doppler Profiler (ADP), constatou que próximo ao município de Pontal do Paraná, as correntes se deslocam para sul nos períodos de vazante do CEP. Próximo ao município de Matinhos, a direção do fluxo inverteu-se de norte para sul durante o período de levantamentos. Na área próxima a Praia de Leste, a direção preferencial das correntes é para norte, o que segundo o mesmo autor, deve-se ao período de estufa de vazante, quando se têm correntes costeiras sem ação da maré. As velocidades das correntes observadas ficaram entre 20 e 30 cm/s, sugerindo que há pouca possibilidade de ressuspensão e transporte de sedimentos em condições de tempo bom na porção da plataforma interna.

O clima na região litorânea paranaense (altitude inferior a 700m.) é do tipo Cfa da classificação de Köppen (subtropical úmido mesotérmico), o qual se caracteriza por apresentar temperatura média para o mês mais quente acima de 22°C, temperatura média para o mês mais frio entre 18°C e -3°C e precipitação regular todos os meses do ano, sem estação seca (ANGULO, 1992). A temperatura média anual na região varia entre 20.8 e 22°C. (IPARDES, 1991). Efeitos orográficos geram uma marcada variação espacial na intensidade de precipitação da região (SANTOS; GOMES, 1998), produzindo intensidades médias anuais relativamente inferiores na zona limite entre a Serra do Mar e o primeiro planalto (1500 a 2000 mm) e nas regiões baixas de planície (2000 mm) e valores mais elevados na zona

montanhosa litorânea (2000 a >2500 mm), sendo esta variabilidade aguçada no verão (SUDERHSA, 1998). As médias históricas anuais de precipitação e evaporação correspondem a 2545 e 405 mm, em Antonina (1978-97), 1924 e 576mm, em Morretes (1966-97) e 2033 e 787 mm, em Paranaguá (1931-88) (MARTIN, 1992; MANTOVANELLI, 1999). A maior média de precipitação, superior a 3400mm (1975-1994) tem sido reportada para a região próxima ao pico do Marumbi (estação Véu da Noiva) (SANTOS; GOMES, 1998).

Assim como na plataforma continental, o regime de ventos é controlado pela influência da Alta do Atlântico Sul e pela passagem de sistemas frontais, sendo que a cadeia de montanhas da Serra do Mar age como barreira contra estas frentes, resultando na concentração de frentes estacionárias na região das baías (LANA *et al.*, 2000). Os ventos predominantes são os dos setores ENE, E, ESE e SE, com intensidade média de 4 m.s-1. (CAMARGO; MARONE, 1995).

De acordo com MARTIN (1992), duas estações são bem marcadas: (1) de novembro a março, quente (temperatura média de 24,5 °C) e muito úmida (precipitação mensal média de 227,4 mm) e (2) de abril a setembro, mais amena (temperatura média de 18,8 °C) e menos úmida (precipitação mensal média de 111,4 mm).

Apesar de sua pequena extensão em comparação aos outros estados brasileiros, destaca-se no litoral paranense a ocorrência de dois importantes sistemas estuarinos. A Baía de Guaratuba, localizada na porção sul do litoral, com aproximadamente 50 km² (NOERNBERG *et al.* 2002) de área superficial líquida e o Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá (CEP), com área superficial de 551.8 km² (NOERNBERG *et al.* no prelo). Os dois estuários são caracterizados geomorfologicamente como estuários de planície costeira, com deltas de maré em suas desembocaduras (ANGULO, 1992).

O CEP possui dois eixos principais: o eixo Leste-Oeste (L-O), representado pelas baías de Paranaguá e Antonina, e o eixo Sul-Norte, representado pelas baías das Laranjeiras, Guaraqueçaba e Pinheiros, conectadas por diversos canais de maré. No interior do CEP existe uma grande diversidade de ambientes, como planícies de maré, manguezais, marismas, baixios, canais de maré, praias arenosas e costões rochosos.

Este sistema estuarino recebe a drenagem de aproximadamente 70% da área da bacia hidrográfica litorânea do Estado do Paraná (Bacia Atlântica). As Baías de

Antonina e de Paranaguá sofrem uma maior influência do aporte de água continental, sendo drenado para esta região o aporte de água doce de uma área de 2.188 km², equivalente a 54% da área de drenagem de todo o complexo (MANTOVANELLI, 1999).

Duas sub-bacias hidrográficas principais são identificadas na área de estudo: (1) sub-bacia da baía de Antonina que desemboca no eixo N-NW na cabeceira de Antonina, cujo principal rio é o Cachoeira, e (2) sub-bacia do Nhundiaquara, que deságua no eixo S-SW da baía de Antonina, tendo como principal afluente o rio de mesmo nome (BIGARELLA *et al.*, 1978; MARTIN, 1992; MANTOVANELLI, 1999). Ainda de acordo com Mantovanelli (1999), os rios destas sub-bacias nascem nas encostas da Serra do Mar, em altitudes entre 100 e 1900 m, com cotas da nascente superiores a 1000 m para os principais rios, sendo que os pontos mais elevados são encontrados nos divisores de drenagem da sub-bacia de Antonina (>1800 m) (SOARES *et al.*, 1997). As bacias hidrográficas de Antonina e Paranaguá apresentam deficiência hídrica no inverno e excedente hídrico no verão, com uma intensificação do aporte de água doce no estuário e maior potencial de erosividade resultante do aumento da precipitação (NOERNBERG, 2001).

As águas subterrâneas também desempenham importante papel neste sistema. Nas áreas planas, o nível do lençol freático fica muito próximo à superfície, ficando exposto durante a estação chuvosa. (Lana *et al.* 2000). Apesar de investigações mais detalhadas não terem sido realizadas, evidências apontam que a água subterrânea tem contribuição significativa para a descarga total na baía de Paranaguá e para a formação das correntes residuais. (MARONE *et al.*, 1997, 2005).

A hidrodinâmica do CEP é regida por duas principais forçantes: descargas fluviais e marés. A maré na Baía de Paranaguá é predominantemente semi-diurna com desigualdades diurnas, apresentando forte assimetria nas elevações e correntes de maré. As componentes da maré astronômica mais importantes são as componentes semi-diurnas M2 e S2, representando cerca de 50% da altura da maré. As componentes, não lineares, ter-diurna (M3) e quarto-diurna (M4) e as compostas, ou de pequeno fundo (MN4 e MS4), apresentam grande importância no comportamento da onda de maré, em termos de elevação e velocidade de corrente. Da desembocadura à cabeceira da baía, verifica-se: (1) uma amplificação da altura de maré; (2) um incremento na assimetria das correntes e; (3) um aumento na amplitude das constituintes de águas rasas da onda de maré (principalmente MS4 e

MN4) e da componente quarto-diurna (M4), gerado pelas interações não lineares da onda com os limites do corpo estuarino (CAMARGO, 1998; MARONE; JAMIYANAA, 1997). Esta amplificação da maré em direção à cabeceira resulta da característica hipersíncrona do estuário, onde o efeito da convergência excede ao atrito (MANTOVANELLI, 1999), sendo basicamente controlada por ressonância, que depende da frequência de oscilação da onda de maré e do comprimento do estuário (CAMARGO, 1998).

O grau de estratificação em sistemas estuarinos depende basicamente do equilíbrio entre a força restauradora do gradiente de densidade que tende a manter a estratificação e o efeito da turbulência gerado pelos gradientes de velocidade (MANN & LAZIER, 1996). Os processos de estratificação halina e mistura vertical são extremamente dinâmicos, sendo alterados tanto em escala horária, relativa ao ciclo da maré, quanto entre os ciclos de sizígia e quadratura em função da variação na intensidade das correntes de maré, onde a circulação gravitacional e a difusão são processos importantes para o balanço de sal. MANTOVANELLI (1999) classificou a região em frente ao Porto de Paranaguá, como estuário parcialmente misturado, tipo 2, com estratificação vertical de salinidade realçada durante o verão. Com relação à distribuição de propriedades, a referida área foi caracterizada como verticalmente e lateralmente não-homogênea. Entretanto, é sabido que existe na região uma variação do padrão de circulação e de estratificação entre as estações secas e chuvosas, sendo as médias no verão entre 12 e 29 para salinidade e 23 e 30 °C para temperatura e no inverno entre 20 e 34 para salinidade e 18 e 25 °C para temperatura (LANA *et al.*, 2000).

O CEP apresenta duas desembocaduras com deltas de maré formados na plataforma continental rasa (< 20 m de profundidade). Estas duas conexões com o oceano Atlântico são denominadas Norte e Sul, de acordo com a sua posição geográfica em relação à ilha do Mel. A desembocadura Norte é composta por dois canais denominados de canais Norte, localizado a norte da ilha das Palmas, e Sueste, localizado a sul da mesma ilha. A desembocadura Sul apresenta um canal chamado Galheta. Os três canais serviram como via navegável ao interior do CEP, de forma que passaram por diversas dragagens. Atualmente a via de acesso navegável é o canal da Galheta. (LAMOUR, 2007).

No setor interno do canal da Galheta, as velocidades máximas de correntes de maré são de 59 cm/s nos períodos de maré enchente (direção 320°) e 97 cm/s

nos períodos de maré vazante (direção 140°) (MARONE *et al.*, 1997). As correntes, neste ponto do estuário, estão direcionadas diretamente ao canal principal de vazante, afunilando o fluxo de marés entre as ilhas do Mel e da Galheta. Neste local é encontrada a maior profundidade do CEP, chegando a 35 metros.

As direções das correntes no par de bóias sinalizadoras 3-4, situadas 4 km ao largo da desembocadura do CEP, acompanham a orientação do canal de acesso marítimo ao CEP, que é SE-NW, com leve desvio para Leste das correntes de vazante. As correntes de vazante são mais intensas que as de enchente, tanto na superfície quanto no fundo, e possuem menor variação na sua direção. A presença de um canal mais profundo na região da desembocadura, atuando como uma barreira hidráulica causa diferenças no deslocamento realizado por uma partícula em suspensão carregada pelas correntes de maré. Se esta partícula estiver localizada na margem Sul do canal, seu deslocamento será para SE, enquanto que, se estiver na margem Norte, seu deslocamento será para Leste. (NOERNBERG, 2001).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CAMPANHAS DE COLETA DE DADOS HIDROGRÁFICOS

A estratégia de amostragem visou identificar as mudanças em curta escala de tempo na estrutura hidrográfica em estações fixas ao longo de um transecto oceanográfico posicionado na região de mistura das águas estuarinas com as águas da plataforma continental adjacente. O transecto teve como extremidades as posições 25° 34,03' S – 48° 33,2' W, e orientação noroeste sudoeste, acompanhando o eixo central do canal da galheta (FIGURA 03).

Prestaram apoio a esse trabalho as lanchas *Baeti*, e *Dose Dupla* do Centro de Estudos do Mar, dois barcos de pescadores locais, além das lanchas de apoio às manobras de navios da Paranaguá Pilots Serviços de Praticagem, que diariamente navegam pela área de estudo e foram utilizadas como embarcações de oportunidade.

Para amostragem da estrutura hidrográfica do transecto, foram definidas 10 estações de coleta, com espaçamento entre elas variando de 2,5 km a 5,5 km. As profundidades das estações variaram de 13 a 20 metros com o ponto T3 atingindo 35 metros de profundidade (FIGURA 3). Realizou-se um total de 58 campanhas de coleta de dados hidrográficos, divididos em dois períodos, verão (entre 15/12/07 e 12/04/07) e inverno (entre 06/08/07 e 28/09/07). Esperava-se com essa estratégia amostrar diversas condições ambientais, como períodos de tempo bom, agitação marítima, período com e sem chuva e marés de quadratura e sizígia. Devido às limitações das embarcações utilizadas, nem sempre foi possível amostrar todas as estações do transecto, sendo que apenas nas primeiras 4 saídas de campo foram realizadas medições nas estações T9 e T10, sendo mais comum a medição das estações T1 a T8.

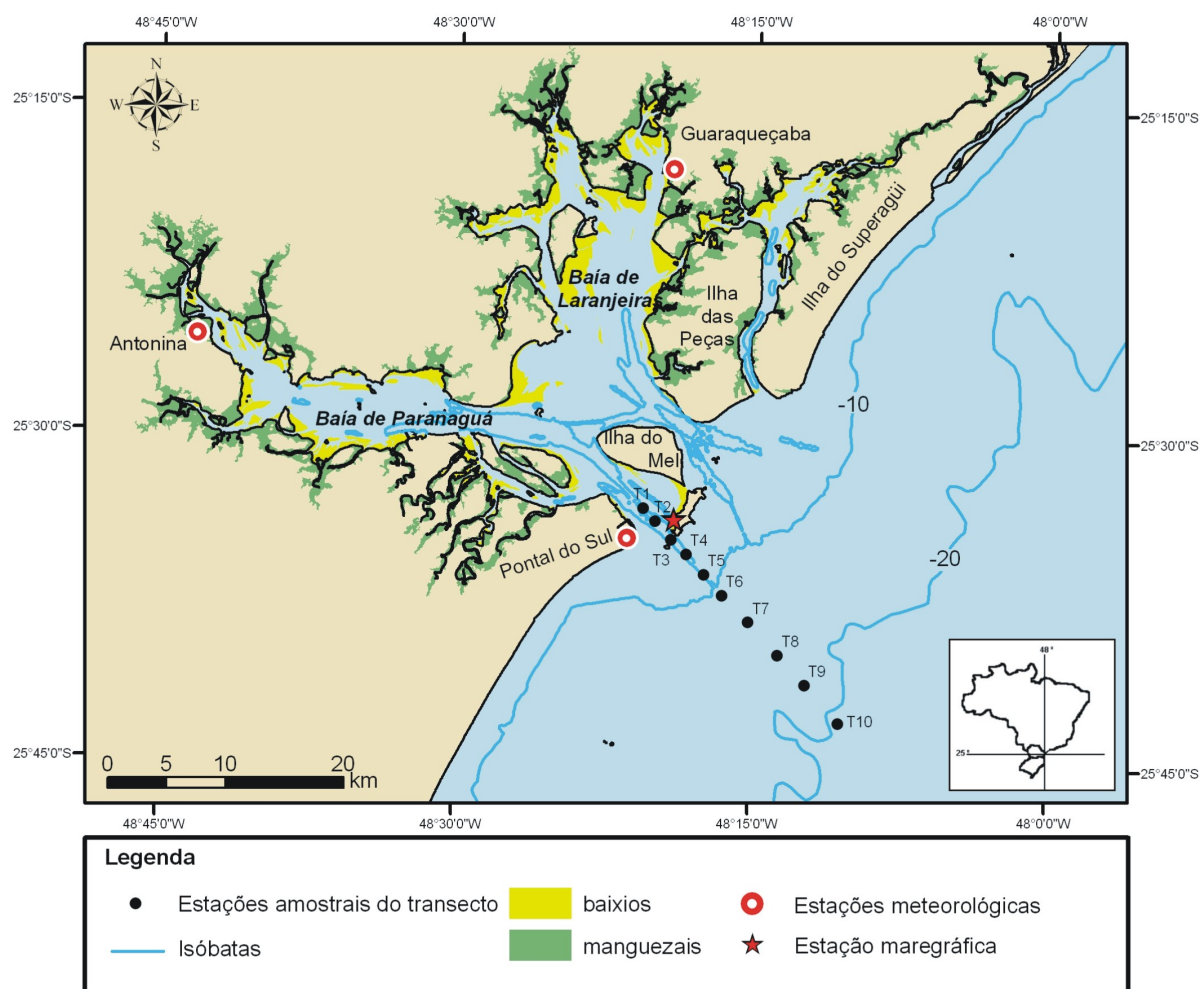


FIGURA 3 – COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ (CEP), PLATAFORMA CONTINENTAL ADJACENTE E LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES AMOSTRAIS

Após cada estação ser localizada com o auxílio de um GPS (marca *Garmim*, modelo *etrex* – com precisão média entre 9 e 15 metros), tomava-se nota da data, hora e condições do mar. Em seguida era realizado um perfil hidrográfico vertical contínuo de salinidade, temperatura, densidade, direção e intensidade de correntes.

Para se obter uma resolução adequada dos suaves gradientes de propriedades existentes em plumas, são necessários métodos de medição de alta acurácia e precisão (MORRIS *et al.*, 1995). Devido a essa necessidade escolheu-se para este trabalho, dentre os equipamentos disponíveis, o correntômetro eletromagnético S4, fabricado pela *InterOcean Systems*, além de medir direção e velocidade de correntes, o modelo escolhido é dotado de sensores de temperatura, pressão e condutividade elétrica, a partir dos quais deriva os valores de salinidade,

temperatura, densidade e profundidade com acurácia de 0.05°C, 0.002 g/kg e 0.1 m, respectivamente (INTEROCEAN, 1992).

Estando devidamente calibrado e configurado para tomar amostras a cada meio segundo, o equipamento, preso a um cabo, era colocado na superfície do mar e após 30 segundos de espera para estabilização dos sensores era manualmente solto até o leito marinho. O equipamento então era puxado lentamente de volta à superfície. Devido ao menor ruído, os dados utilizados para análise foram os obtidos no percurso entre o fundo e a superfície. Como na maioria das campanhas foram utilizadas embarcações de oportunidade, fato que impediu a ancoragem da embarcação para a realização dos perfis, sendo os mesmos realizados com a embarcação à deriva, apenas puderam ser utilizados os dados de correntes das duas primeiras saídas de campo.

4.2 PROCESSAMENTO DOS DADOS HIDROGRÁFICOS

Após o término dos cruzeiros, os dados foram transferidos do equipamento S4 utilizados em campo para o computador através do software de comunicação do fabricante, S4app (InterOcean systems) que automaticamente calcula os valores de profundidade, salinidade e densidade a partir dos dados diretamente obtidos de temperatura, pressão e condutividade elétrica.

A tabela de dados resultante foi exportada em formato ASCII, texto separado por tabulação, e importada na planilha eletrônica *Excel*, para filtragem e organização dos dados. Com base no horário da amostragem de cada estação, anotado em planilha de campo, foram localizados os valores referentes ao perfil hidrográfico na tabela do S4 e separados dos dados não-válidos registrados durante os períodos em que o equipamento permanecia fora da água. Eventuais valores ruidosos foram corrigidos pela média dos valores vizinhos.

Para cada campanha de campo, os valores obtidos em todas as estações foram organizados em uma planilha de três colunas ou variáveis. Sendo X a distância em km do ponto amostrado em relação ao ponto T1, Y a profundidade e Z a salinidade, temperatura ou densidade.

A estrutura hidrográfica de todo o transecto foi resolvida interpolando os valores entre os perfis e entre as profundidades com o auxílio do software *Surfer 8.0*

(*Golden Software*). O método de interpolação utilizado foi a interpolação linear com geometria triangular. Esse procedimento matemático foi escolhido após serem feitos diversos testes com outros métodos de interpolações disponíveis no aplicativo, sendo esse método o mais adequado aos propósitos do estudo. A interpolação linear cria valores médios entre duas medições, sem preferência ou peso em determinada direção. O intervalo de resolução escolhido para a interpolação foi de meio metro no eixo y (ou profundidades) e de dois metros e setenta centímetros no eixo x (ou comprimento do transecto).

A amplitude de variação dos valores e a escala de cores utilizada na representação gráfica dos dados foram padronizadas para todos os levantamentos, levando em consideração os valores máximos e mínimos encontrados para cada uma das variáveis durante todo período amostral (verão e inverno). Procedimento necessário para padronizar a escala e permitir que os gráficos resultantes possam ser visualmente comparados.

Foram utilizados também os dados de maré referentes ao período de estudo registrados pela estação maregráfica da Paranaguá Pilots Serviços de Praticagem S/C Ltda, situada próximo à desembocadura sul do CEP (FIGURA 3). Estes dados são registrados em intervalos de três minutos e representam a altura instantânea do nível do mar em metros em relação ao nível de redução determinado para a região pela Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil.

Os dados meteorológicos (velocidade e direção dos ventos, temperatura do ar, precipitação e pressão atmosférica) foram obtidos através da estação meteorológica do Centro de Estudos do Mar da UFPR, situada em Pontal do Sul. Também foram utilizados os dados de precipitação de uma estação meteorológica situada em Antonina, no extremo oeste do CEP. Estes dados foram gentilmente cedidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR). Em algumas análises também foram utilizados dados de precipitação para a localidade de Guaraqueçaba, que foram obtidos junto ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) (FIGURA 3).

4.3 DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Foram utilizadas 24 imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Acqua. As imagens foram obtidas gratuitamente através do site da NASA

(<http://laad.gsfc.nasa.gov/>) a partir das coordenadas geográficas referentes a um ponto central pertencente à área de estudo (25°-26°S e 47°-49°W). As ferramentas de busca do site possibilitam a visualização prévia das imagens geradas através do dispositivo “*Quick Look*”, os quais foram armazenados para compor um banco de dados. Para cada dia entre janeiro e setembro de 2007, foi verificada a qualidade das imagens, do ponto de vista da quantidade de nuvens presentes, do ângulo de visada do sensor durante o imageamento da área, e dos possíveis ruídos que pudessem inviabilizar o uso das mesmas, entre estes o *sunglint* - faixa vertical esbranquiçada resultado da reflexão solar, que superestima os valores geofísicos e atinge a área de estudo durante o verão (FELDMAN *et al.*, 2005).

Dentre os diversos produtos oferecidos pela NASA, foi escolhido o MYD01 – *Raw Radiances in Counts*, imagem do nível 1A, em formato HDF (*Hierarchical Data Format*), com informações brutas de radiância para todas as bandas, calibração e navegação (SAVTCHENKO *et al.*, 2004). A aquisição de imagens nesse nível bruto de processamento permite um maior controle do pesquisador a respeito das calibrações e transformações realizadas até o produto final desejado. O pedido foi feito através do mesmo *website* utilizado na visualização das “*quick looks*”, e o download do produto via FTP (*File Transfer Protocol*), no endereço <ftp://laadsweb.nascom.nasa.gov>. Ao todo, fez-se o download e processamento de 25 imagens.

Todo o processamento foi feito através do aplicativo SeaDAS v.5.0.5, disponibilizado gratuitamente pela NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). A sequência de processamento consistiu-se das seguintes etapas:

1. Georreferenciamento das imagens no nível 1A - geração do arquivo modis.GEO, que contém dados de latitude e longitude geodésicos, zênites e azimutes do sol e do satélite, além da altura do terreno a partir do geóide. A partir deste arquivo surgem também as máscaras de delimitação terra/oceano em malha de 1 km x 1 km, para aumentarem e focarem o contraste no oceano, e linha de costa (GFSC / DAAC / NASA, 2006).
2. Delimitação da área de estudo – extração da imagem através das coordenadas e geração de um novo modis.1A e de um novo modis.GEO.
3. Transformação de 1A+GEO para 1B – radiâncias georreferenciadas no topo da atmosfera, calibradas em $\text{Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$ (GFSC / DAAC / NASA, 2006) - geração de três arquivos, com resolução espacial de 1 km, 500 m e 250 m.

4. Transformação de nível 1B para nível 2 – radiâncias calibradas, georreferenciadas, com aplicação de correção atmosférica (a partir de dados meteorológicos como ozônio, pressão, ventos, etc, acessados via FTP durante o processamento) e algoritmos bio-ópticos em resoluções espaciais finais de 1000, 500 ou 250 metros. Assim, o arquivo L1B de entrada precisa ser o de 1 km, pois é o que possui as bandas específicas para a aplicação oceânica e atmosférica. Nessa etapa, pode-se escolher entre diversos parâmetros geofísicos a serem gerados, ex: clorofila, temperatura da superfície do mar, reflectância de sensoriamento remoto, etc. Para a observação da turbidez costeira, optou-se pela utilização da radiância emergente da superfície do mar normalizada, centrada no comprimento de onda 555 nm (nLw_{555}). Segundo Li *et al.* (2003) a nLw_{555} apresenta maior sensibilidade à turbidez em águas costeiras.
5. Definição de dois transectos em direção ao oceano, com extensão de 70 km cada, para a retirada dos valores de radiância, através da função RLINE do SeaDAS. Os transectos foram posicionados próximos à desembocadura sul e norte do CEP (FIGURA 4). Os dados foram organizados por transecto em planilhas eletrônicas. Valores negativos ou muito elevados (representando ruídos) foram removidos nas planilhas.
6. Mudança de projeção, de cilíndrica para Mercator, a fim de facilitar a sobreposição e comparação visual das imagens. Essa transformação foi feita através do SeaDAS com aplicação de uma gradação de cores padrão para nLw_{555} . O nível de contraste das imagens foi padronizado para todas as imagens.

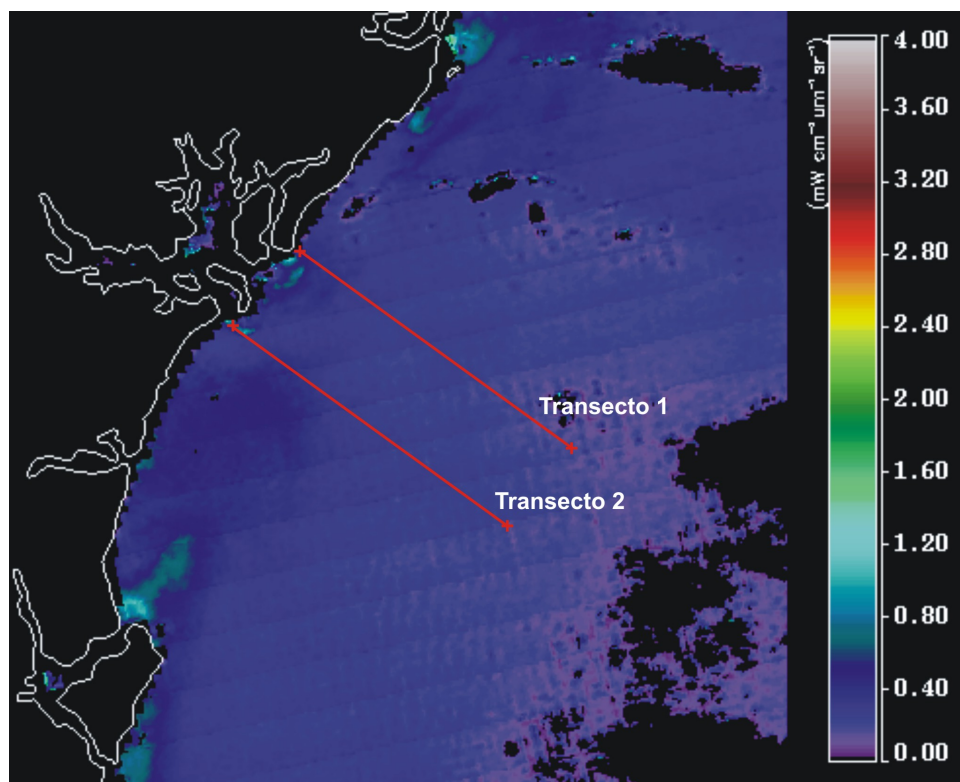


FIGURA 4 – LOCALIZAÇÃO DOS TRANSECTOS SOBREPOSTOS SOBRE AS IMAGENS MODIS PARA A RETIRADA DOS VALORES GEOFÍSICOS DE $nLw555$
FONTE: NASA (2007) DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CLIMATOLOGIA E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS

Durante o período de realização das amostragens de campo, foram analisados os seguintes parâmetros meteorológicos que podem exercer influência sobre as variáveis físicas da coluna d'água: temperatura do ar, precipitação, pressão atmosférica, intensidade e direção do vento. A temperatura média do ar (FIGURA 5), registrada pela estação meteorológica do centro de estudos do mar em Pontal do Sul, apresentou pequena anomalia em relação aos valores médios mensais de 29 anos, entre 1961 e 1990 (DNM, 1992). Durante o período de realização desta pesquisa o mês de março apresentou-se como o mais quente, com temperatura média de 26.2 °C. Julho foi o mês mais frio, com temperatura média de 15.8°C.

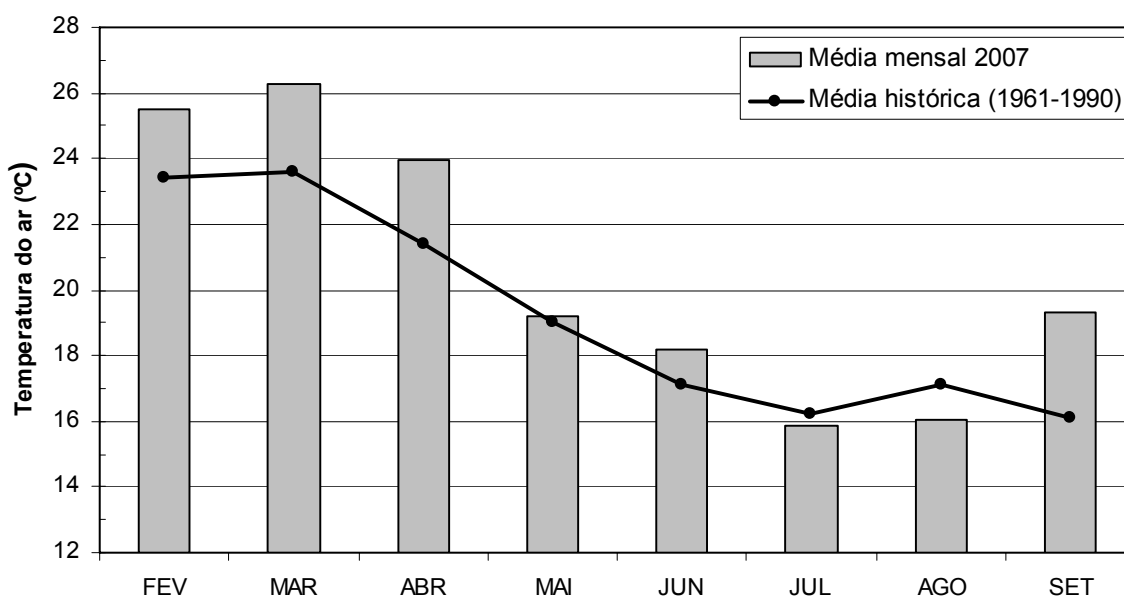


FIGURA 5 – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL DO AR REGISTRADA EM PONTAL DO SUL PARA O PERÍODO DE ESTUDO E MÉDIA MENSAL HISTÓRICA ENTRE 1961 E 1990 PARA PARANAGUÁ

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA – UFPR (2007) E DNM (1992)

Para análise da precipitação foram utilizados dados da estação de Pontal do Sul, e também de estações meteorológicas situadas nas cidades de Antonina e Guaraqueçaba, devido não só às diferenças no regime pluviométrico, mas também

ao fato de que variações na salinidade, próximo à desembocadura do estuário, podem estar relacionadas a chuvas ocorridas em outras partes da bacia de drenagem. Para o período de estudo, o coeficiente de correlação de Pearson (r) entre a pluviosidade total mensal de Pontal do Sul e Antonina foi de 0.75, de Pontal e Guaraqueçaba 0.91 e de Guaraqueçaba e Antonina 0.80. O total mensal de pluviosidade em Pontal do Sul ficou abaixo da média histórica durante todos os meses analisados, com exceção de maio. Em junho, foi registrada em Pontal do Sul apenas 9.4% da pluviosidade média histórica para esse mês. Guaraqueçaba apresentou pluviosidade acima da média somente em maio e julho, estando abaixo nos demais meses. Em Antonina a pluviosidade foi maior do que em Pontal do Sul e Guaraqueçaba em todos os meses analisados (FIGURA 6).

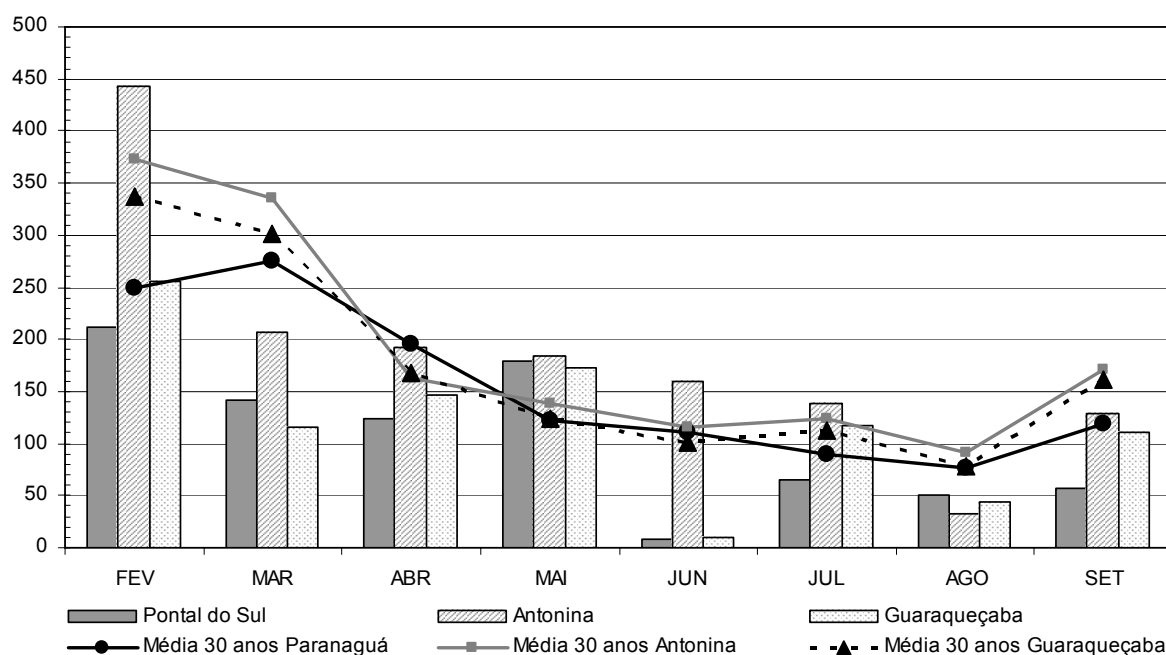


FIGURA 6 – PRECIPITAÇÃO MENSAL MÉDIA DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO PARA PONTAL DO SUL, ANTONINA E GUARAQUEÇABA E MÉDIAS HISTÓRICAS MENSAIS PARA 30 ANOS EM PARANAGUÁ, ANTONINA E GUARAQUEÇABA

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA – UFPR (2007), SIMEPAR (2007) E IAPAR (2007)

Segundo Santos e Gomes, 1998, efeitos orográficos geram uma marcada variação espacial na intensidade de precipitação da região, responsáveis pelos diferentes valores de precipitação observados entre as localidades. Entretanto, as diferenças observadas nas médias históricas, entre as três estações meteorológicas são menores nos meses de inverno. Provavelmente isso se deve ao fato de que

nesta época do ano, a pluviosidade está mais relacionada à passagem dos sistemas frontais pela região, causando chuvas de maneira mais homogênea sobre as diferentes partes da bacia de drenagem. Já no verão a precipitação é na maior parte das vezes causada pela formação de nuvens e tempestades mais localizadas, principalmente no período da tarde, devido ao maior aquecimento pela radiação solar, distribuindo chuvas intensas e de curta duração de maneira desigual nas diferentes localidades. Mapas de isopleias apresentados por Suderhsa (1998) confirmam que a precipitação na região tem variabilidade espacial aguçada durante o verão.

Com relação à temperatura, os meses de fevereiro, março e abril apresentaram valores de mais de 2°C acima da média histórica, e os meses de julho e agosto valores abaixo da média (0.3°C e 1°C respectivamente). Na localidade de Pontal do Sul o ano de 2007 teve, portanto, em relação à média histórica, um verão mais quente e um inverno mais frio.

De acordo com a análise climática apresentada por CPTEC (2007), o ano de 2007 foi caracterizado como quente e relativamente seco. O posicionamento da zona de convergência do Atlântico Sul mais ao norte em fevereiro e a predominância de uma massa de ar seco sobre o Paraná resultou na diminuição da umidade relativa. Essa massa de ar seco também impediu a passagem dos sistemas frontais, ocasionando uma precipitação abaixo da média no litoral do paranaense. Em junho também houve a persistência de uma forte massa de ar seco, ocasionando temperaturas elevadas e precipitações abaixo da média.

A pressão atmosférica apresentou uma variação sazonal com valores médios inferiores a 1013 mBar em fevereiro com tendência de aumento gradativo ao longo dos meses, chegando a 1020.4 em agosto (FIGURA 7).

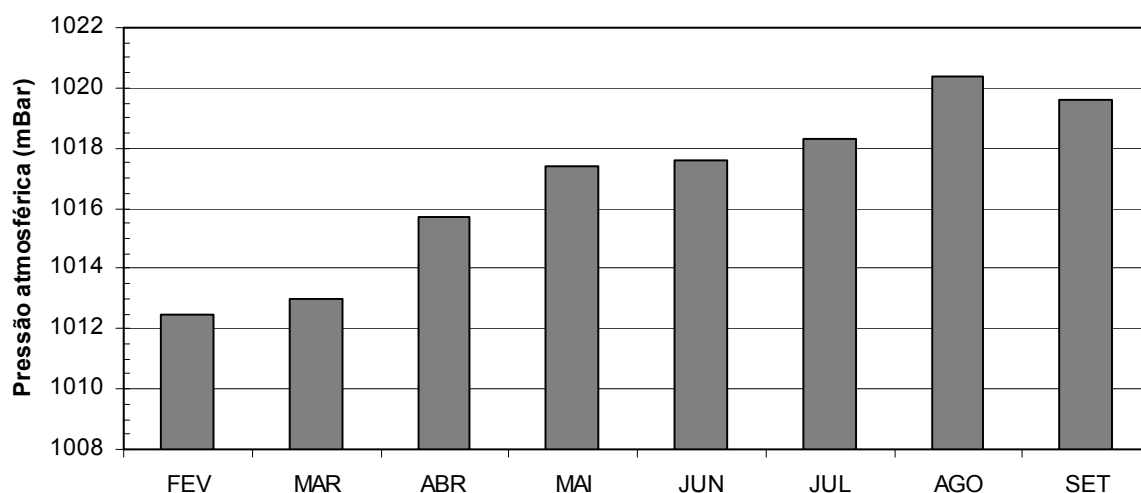


FIGURA 7 - MÉDIA MENSAL DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA PARA PONTAL DO SUL DURANTE O PERÍODO DE ESTUDO

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA – UFPR (2007)

O mês de fevereiro foi o de maior intensidade dos ventos, com valores médios de 4.2 m/s. Observaram-se ainda velocidades médias de 2.56 m/s no mês de junho. Ventos do quadrante sul e sudeste foram predominantes durante todo o período do estudo (FIGURA 8).

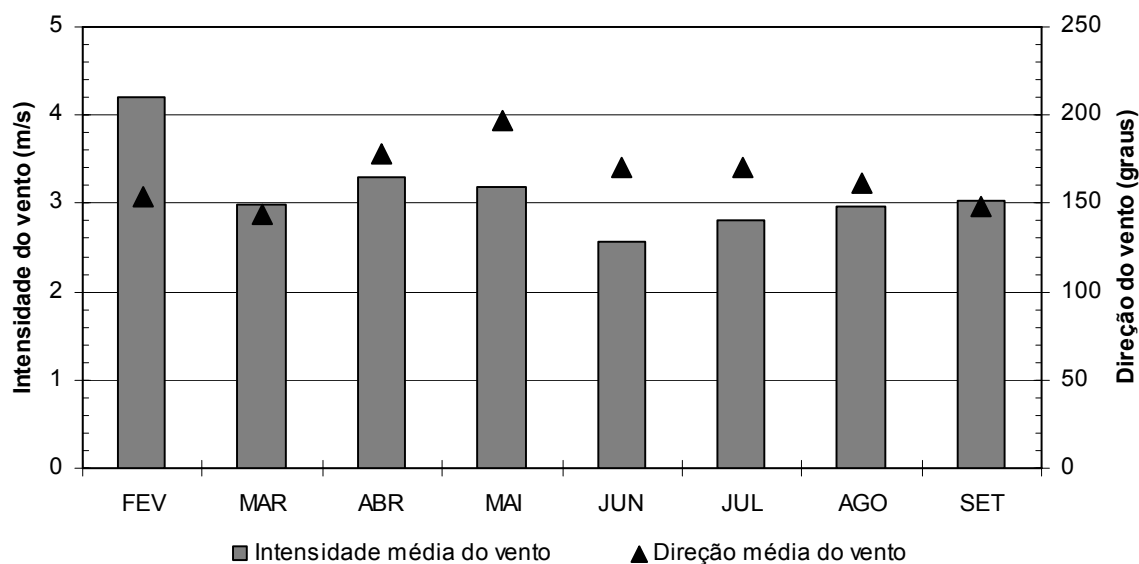


FIGURA 8 – MÉDIAS MENSIAIS DA VELOCIDADE E DIREÇÃO DO VENTO REGISTRADAS EM PONTAL DO SUL PARA O PERÍODO DE ESTUDO

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA – UFPR (2007)

5.2 ESTRUTURAS HIDROGRÁFICAS NO GRADIENTE HALINO

5.2.1 Caracterização espacial

5.2.1.1 Campanhas de verão

Durante os meses de fevereiro março e abril de 2007, foram realizadas 22 campanhas amostrais. A figura 9 mostra os horários das amostragens, plotados sobre a curva da maré observada. O registro foi efetuado pela estação maregráfica da Ilha do Mel, distante 1 km da estação T2. A localização do marégrafo é mostrada na Figura 3. É possível observar nesta figura que foram feitas campanhas em diferentes situações de maré, sendo que em determinadas datas foi realizada mais de uma campanha amostral no mesmo dia.

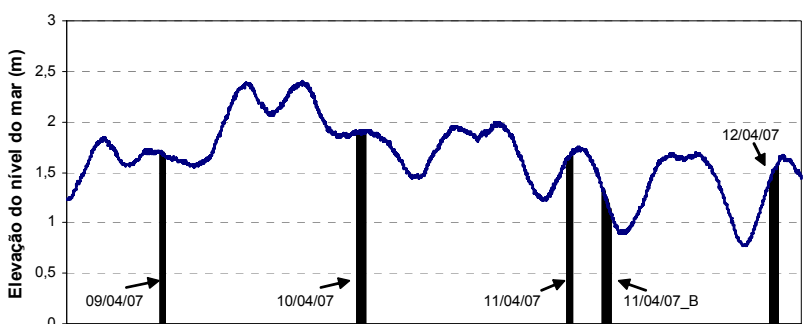
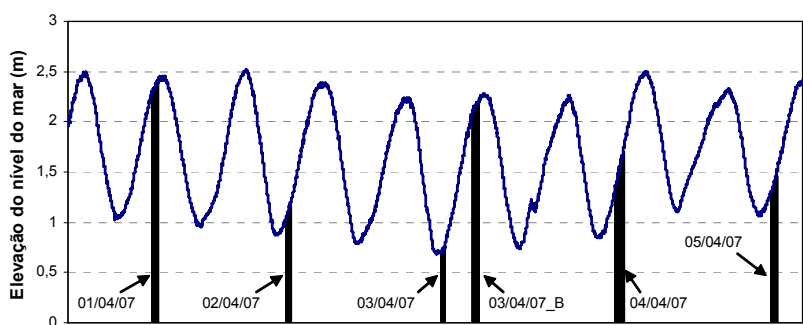
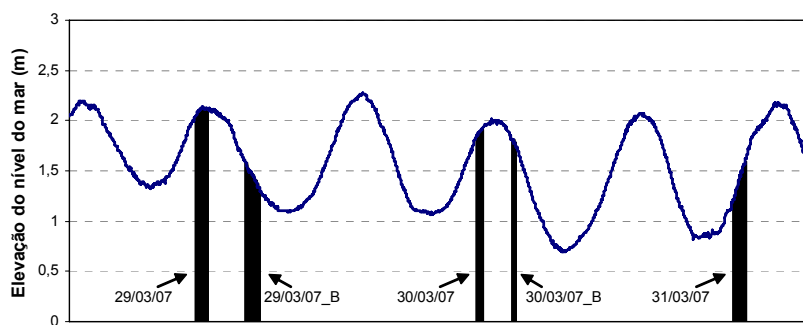
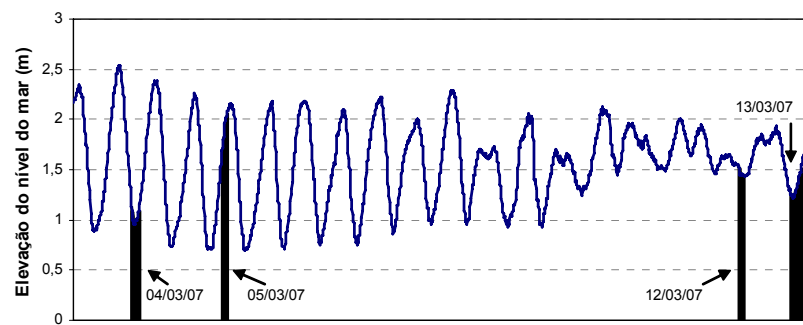
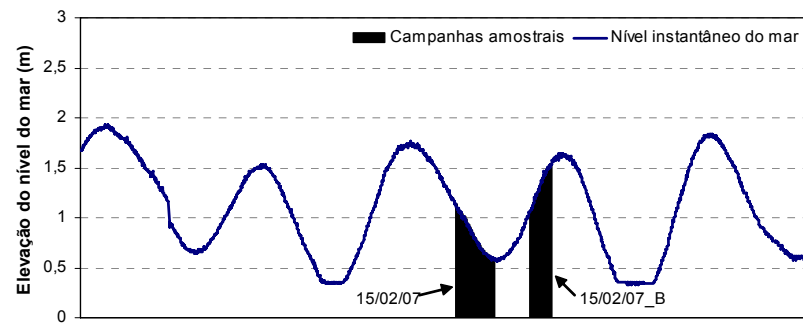


FIGURA 9 – REGISTRO MAREGRÁFICO REFERENTE AO PERÍODO DAS AMOSTRAGENS DE VERÃO

FONTE: PARANAGUÁ PILOTS (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

A figura 10 mostra a pluviosidade acumulada diária, nos períodos anteriores às campanhas de campo, registradas pelas estações meteorológicas do Centro de Estudos do Mar, em Pontal do Sul e do SIMEPAR em Antonina.

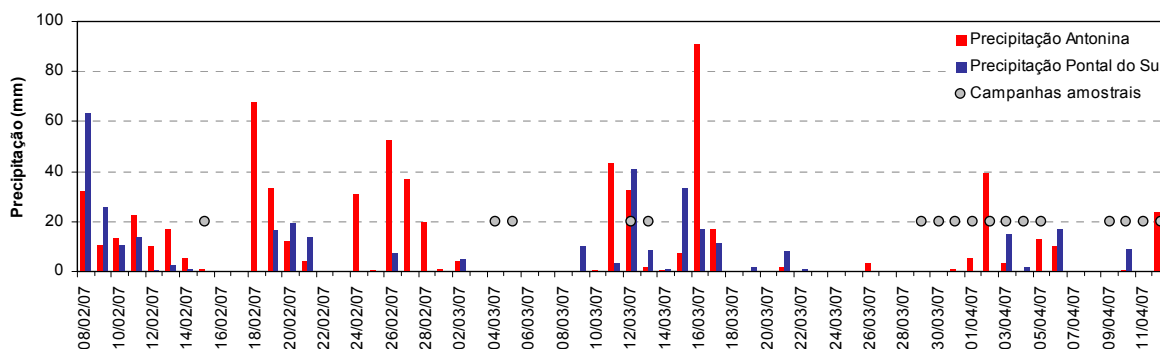


FIGURA 10 – PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DIÁRIA, REFERENTE AO PERÍODO DAS CAMPANHAS AMOSTRAIS DE VERÃO

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA (2007) E SIMEPAR (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

A primeira campanha do dia 15 de fevereiro teve início às 06h35min na estação T1 e final na estação T10 às 08h:40min. O levantamento foi realizado em maré vazante de sizígia (FIGURA 11). A salinidade mínima foi de 25.1 g/kg na camada superficial do ponto T1 e a máxima de 36.1 g/kg em profundidades abaixo de 14 metros no ponto T10. Durante a aquisição dos dados, o vento apresentava direção oeste com intensidade de 1.5 m/s. A precipitação acumulada nos sete dias anteriores foi de 67.4 mm em Pontal do Sul e de 95.8 mm em Antonina. A campanha foi realizada ao final de um período de oito dias de chuvas registradas pelas duas estações (FIGURA 10), com grande aporte de água doce no sistema estuarino.

A coluna d'água apresentou uma forte estratificação salina em todas as estações com variação máxima entre superfície e fundo de 5.5 g/kg na estação T3. Nota-se na figura 11c a penetração da cunha salina nas camadas de fundo a partir da estação T4. Nesta estação, na profundidade de 14 metros, a corrente tem sentido 266° (corrente de maré enchente) e velocidade 76 cm/s. Na camada superficial as correntes têm sentido de vazante (141°) e velocidade de 27 cm/s. As temperaturas apresentaram variações pequenas em toda a coluna d'água e em todas as estações

(FIGURA 11b), com mínimo de 26.3°C e máximo de 27°C. Duas fontes diferentes de água mais fria fez com que as maiores temperaturas fossem encontradas na camada intermediária. Águas superficiais mais frias (<26.5°C), menos salinas e consequentemente, menos densas, são encontradas entre as estações T2 e T4. Essas baixas temperaturas se devem à drenagem continental alimentada pelas chuvas dos últimos dias e ao fato da campanha ter sido realizada no período da manhã, não sofrendo influência do aquecimento pela radiação solar. Águas com temperatura de 26.3°C e salinidade de 36.089 g/kg com características de água tropical (AT), segundo EMILSSON, 1961, ocupam a camada de fundo entre as estações T9 e T10.

Pode-se notar claramente na figura 11, a divisão entre as águas estuarinas e as águas de plataforma com um gradiente vertical de mistura a partir da estação T4. As águas estuarinas com correntes no sentido de vazante, encontram a cunha salina na região da estação T4 formando uma frente vertical de densidade, bloqueando o escoamento da água estuarina, menos densa, por toda a coluna d'água. A isohalina de 31 g/kg que está a mais de 20 metros de profundidade na estação T3 sofre uma forte inclinação a partir deste ponto, passando a ocupar a profundidade de 10 metros no ponto T4. A partir do ponto T5 ela aparece na profundidade de 2.8 metros, perdendo gradativamente seu sinal por diluição com águas mais salinas que entram pela camada de fundo, até não mais serem encontradas salinidades menores que 31.5 g/kg na camada superficial no ponto T6. Pode-se notar que a frente de densidade aprisiona a água estuarina na região da estação T3, localizada entre a ilha da Galheta e a ilha do Mel. Pode-se atribuir ao efeito da batimetria próxima a esta estação como responsável pelo processo de rebaixamento das isolinhas de salinidade e densidade observado neste ponto. Segundo MARONE (com. pess.) as águas mais densas da camada de fundo deslizam para dentro desta depressão no leito marinho (que chega a 35m de profundidade em alguns pontos), gerando um gradiente vertical de pressão na coluna d'água. Este efeito é visível no rebaixamento das isolinhas de densidade na estação T3, e ocasiona o aprisionamento da água estuarina na camada superficial desta região.

A partir da estação T4 a água estuarina começa a ficar restrita à camada superficial, fluindo em direção ao mar aberto, espalhando-se sobre as águas da plataforma, na forma de uma pluma estuarina, enquanto as águas mais densas e salgadas da plataforma adentram o estuário nas camadas imediatamente abaixo.

Um forte gradiente de salinidade superficial ocorre entre as estações T4 e T5, com um aumento na salinidade de 1.24 g/kg/km. A partir desse ponto a mistura da água superficial ocorre gradativamente com menos intensidade até estabilizar com a salinidade de 32.5 g/kg na estação T7, aumentando somente 0.15 g/kg em uma distância de mais de 7 km até o ponto T9, resultando em um gradiente de salinidade de 0.021 g/kg/km.

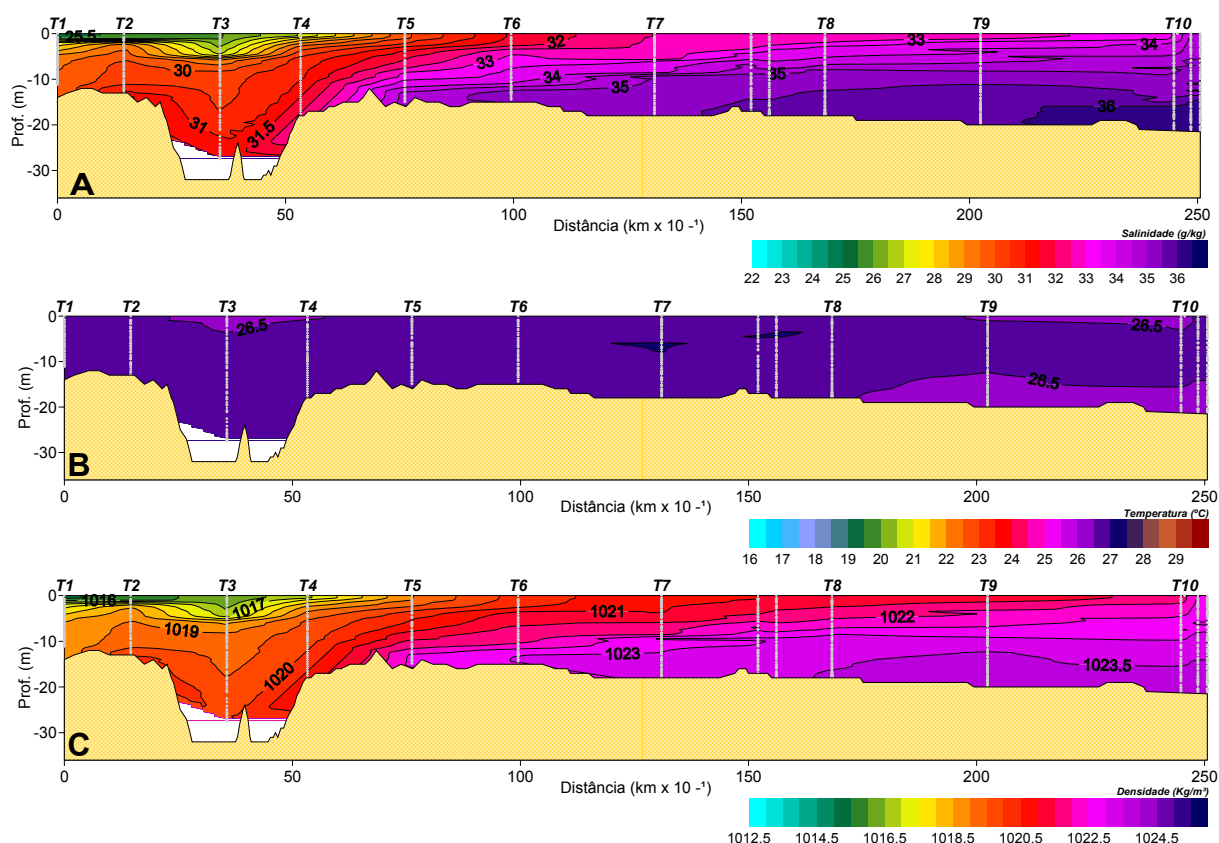


FIGURA 11 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À PRIMEIRA CAMPANHA DO DIA 15 DE FEVEREIRO DE 2007

Durante esta campanha, próximo à estação T10, a uma distância de 20 km da desembocadura do estuário, foi localizada uma frente de superfície, caracterizada visualmente por uma linha de acúmulo de espuma e detritos, com orientação aproximada de SW-NE. Realizou-se então uma perfilagem antes e uma depois desta linha de detritos para caracterizar sua estrutura física interna. Encontrou-se um forte gradiente de salinidade, e conseqüentemente de densidade, entre os dois lados desta feição. A salinidade aumenta 1.25 g/kg em menos de 300 metros entre uma estação e outra, resultando em uma taxa de aumento de salinidade de 4.27 g/kg/km.

A figura 12 ilustra o aspecto visual desta frente de superfície, onde se pode notar, além da aglutinação de espuma e material detritico (inclusive um pedaço de caixa plástica), uma nítida diferença de rugosidade superficial entre os dois lados da frente de superfície, indicando mudança de densidade. Os dados de correntes mostram claramente os fluxos convergentes nesta região, responsáveis pela formação da linha de detritos. Medições realizadas a 1,5 m de profundidade antes da frente indicam uma corrente com direção 71° e velocidade de 20.3 cm/s. Logo após a frente, em direção ao oceano, a corrente tem sentido 195° e velocidade 21 cm/s.



FIGURA 12 – FRENTE SUPERFICIAL ENCONTRADA PRÓXIMA À ESTAÇÃO T10, A 20 KM DA DESEMBOCADURA DO ESTUÁRIO, NO DIA 15 DE FEVEREIRO DE 2007 EM CAMPANHA RELIZADA NO PERÍODO DA MANHÃ EM MARÉ VAZANTE DE SIZÍGIA

A figura 13 ilustra a segunda campanha realizada no dia 15 de fevereiro de 2007, com início no ponto T10 às 12h:40 min e término as 14h:16min no ponto T01. A maré encontrava-se em situação de enchente de sizígia. Os ventos no momento da amostragem variaram entre 2.6 m/s e 5.5 m/s do quadrante sudeste. A salinidade mínima foi de 30.5 g/kg na estação T3 e a máxima de 36 g/kg na camada de fundo das estações T9 e T10. A coluna d'água continua com uma estratificação salina, porém não tão pronunciada quanto durante a maré vazante, apresentando diferenças máximas entre superfície e fundo de 3.5 g/kg no ponto T3.

Com a subida da maré, a cunha salina avança estuário adentro. A isohalina 33 g/kg que na maré vazante tinha seu limite de intrusão entre as estações T4 e T5, neste momento está posicionada entre as estações T1 e T2, avançando 5.5 km. Porém, pode-se notar que, devido ao grande aporte de água doce no sistema durante os últimos dias, (os dados de pressão atmosférica mostram chegada de um sistema frontal na região no dia 6 de fevereiro), ainda existe um forte gradiente horizontal de densidade na camada superficial entre as estações T3 e T4. Isto pode ter ocorrido devido à existência de águas estuarinas menos densas aprisionadas na superfície desta região devido à batimetria local, conforme já descrito anteriormente. A inclinação das isolinhas de densidade entre as estações T3 e T4 também podem constituir um indicativo de maior intensidade nos processos de mistura da água oceânica com a água estuarina.

É possível notar também que mesmo durante a maré enchente ainda ocorre uma saída da água estuarina, com salinidades menores que 32 g/kg, pela fina camada superficial, alcançando a estação T7 com salinidades superficiais de 32.08 g/kg. Os dados de temperatura da água parecem confirmar essa circulação residual. Pode-se observar uma termoclina bem definida, com a camada superficial de 1.5 m de espessura estando 1 ° C mais quente que a camada intermediária, com o maior gradiente de temperatura ocorrendo entre 1.7 e 2 metros de profundidade na estação T6. Provavelmente esta termoclina foi provocada pelas águas aquecidas devido à radiação solar intensa, típica de uma tarde de verão sem cobertura de nuvens, que deixaram o confinamento do estuário flutuando sobre as águas mais densas da plataforma.

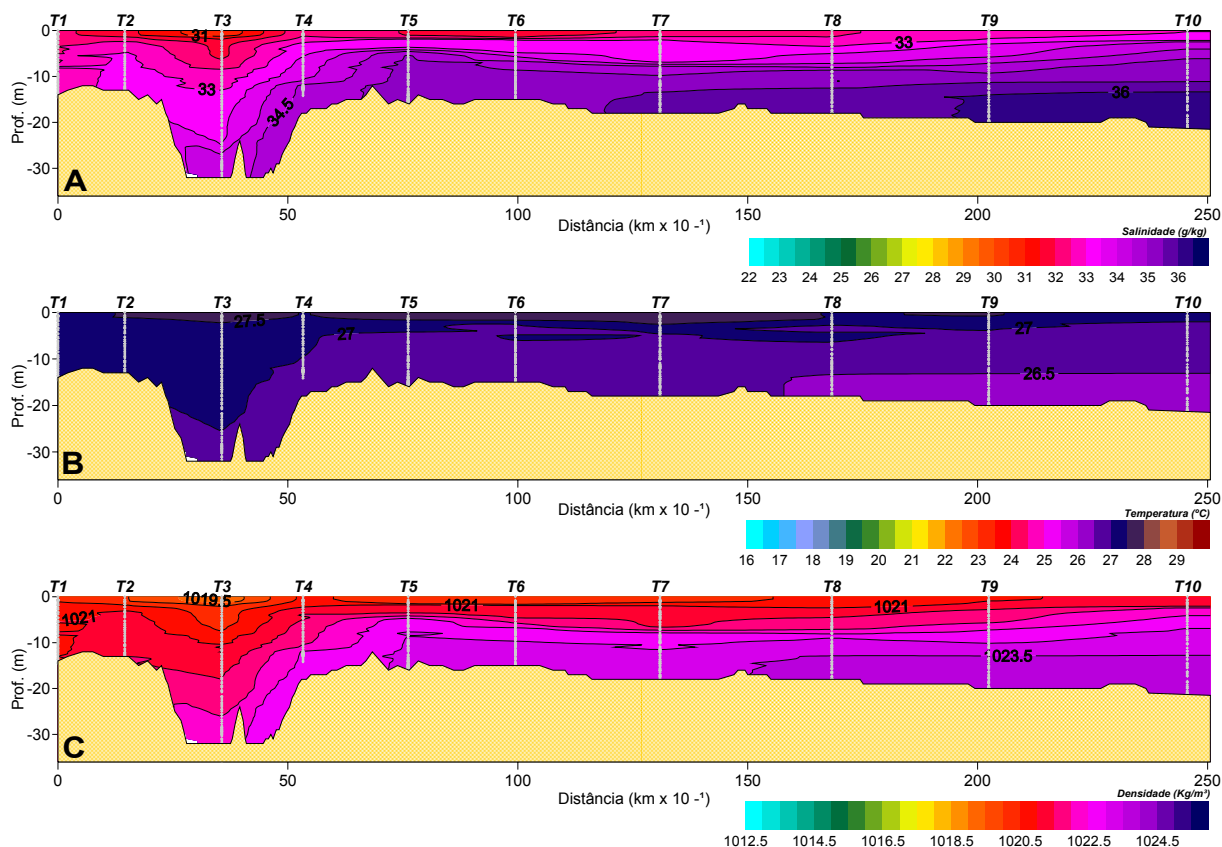


FIGURA 13 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À SEGUNDA CAMPANHA DO DIA 15 DE FEVEREIRO DE 2007

A figura 14 representa a estrutura hidrográfica do transecto amostrado na campanha do dia 04 de março de 2007, tendo início no ponto T1 às 08h:48min e término no ponto T10 às 10h:55min. A amostragem foi realizada durante uma estufa de maré baixa de sizígia (FIGURA 9). A salinidade mínima encontrada foi de 28.81 g/kg na superfície da estação T1 e a máxima foi 35.95 na camada de fundo (17.5 m) da estação T10. No horário de início da campanha os ventos sopravam do quadrante SW com velocidade de 1.4 m/s, mudando para NE com 1.9 m/s ao final do levantamento. A pluviosidade total registrada nos sete dias anteriores à campanha foi 12.2 mm em Pontal do Sul e 114.4mm em Antonina. Entre as estações T5 e T6 ocorre o maior gradiente horizontal de salinidade e densidade, formando uma zona de divisão abrupta entre as águas estuarinas e da plataforma. Entre as estações T1 e T5 a coluna d'água está parcialmente misturada, sendo o gradiente horizontal de salinidade e densidade maior que o vertical. A temperatura permanece homogênea entre as estações T1 e T5, apresentando uma variação de apenas 0.4°C. Na região de plataforma após a estação T6, a coluna d'água

apresenta forte estratificação vertical na salinidade, temperatura e densidade. Na figura 14b é possível notar a presença de uma forte termoclina, com a temperatura nas camadas superficiais em torno de 28°C. Um gradiente intenso de temperaturas ocorre por volta dos 10 metros de profundidade, separando a camada de fundo que apresenta um decréscimo aproximadamente linear da temperatura em direção ao oceano. A máxima variação vertical da temperatura nesta campanha ocorreu na estação T10, com a diferença de 3.2°C entre superfície e fundo. Nos dias anteriores a esta campanha a precipitação registrada pela estação de Antonina foi em torno de 10 vezes maior do que em Pontal do Sul. A distância entre a fonte de água doce e a desembocadura do estuário favorece os processos de mistura desta água da drenagem continental com a água salgada devido à atuação da maré, sendo detectada nas primeiras estações do transecto diluída em toda a coluna d'água.

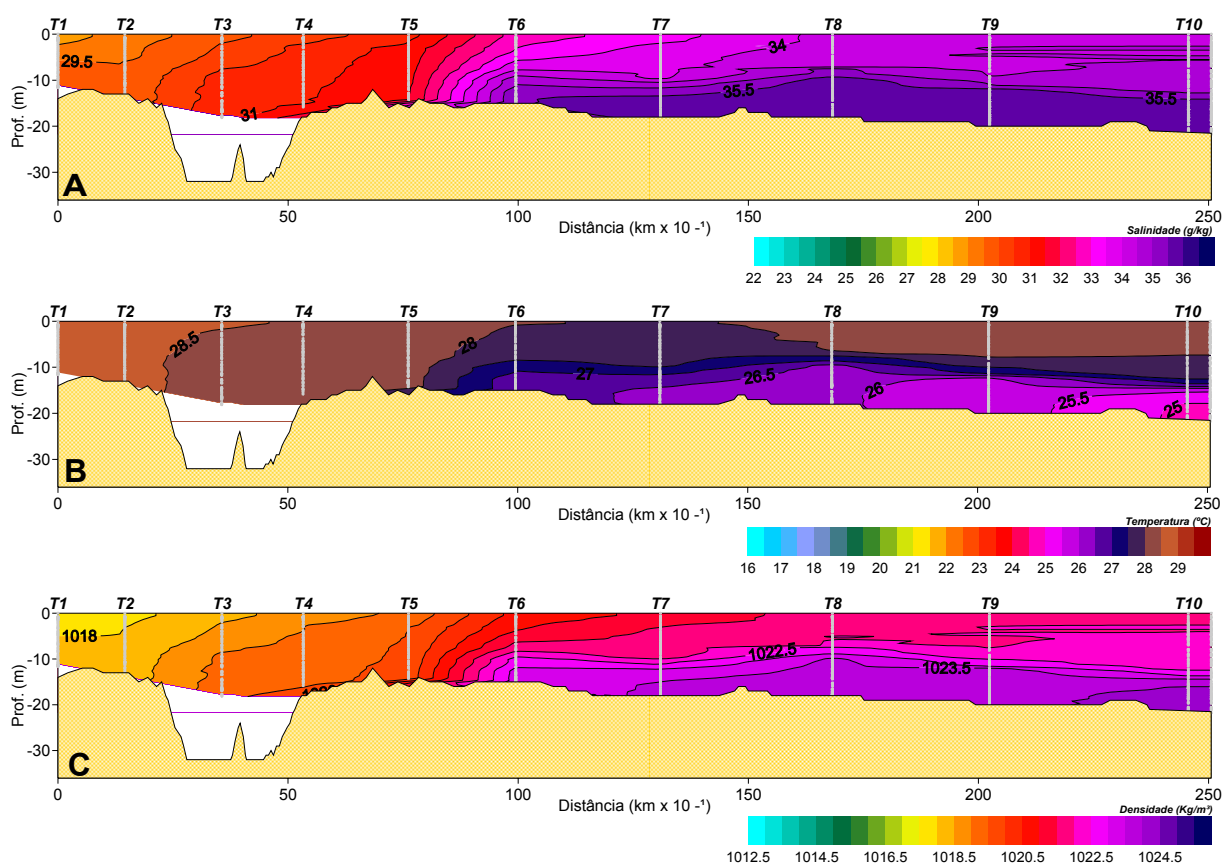


FIGURA 14 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 04 DE MARÇO DE 2007

A campanha do dia 05 de março de 2007 teve início na estação T01 às 14h:04min e final na estação T7 às 15h:38min. A maré no momento da amostragem

encontrava-se no final da enchente de sizígia (FIGURA 9). A menor salinidade encontrada nesta campanha ocorreu na superfície da estação T3 (32.4 g/kg) e a maior, 35.9 g/kg, foi encontrada nos 19.8 metros de profundidade na estação T7. No momento da amostragem o vento era de direção leste com velocidade média de 4.7 m/s. A pluviosidade total nos sete dias anteriores à campanha foi 4.6mm em Pontal do Sul e 115.2mm em Antonina. A figura 15 mostra a estrutura hidrográfica no momento do levantamento. Pode-se notar uma clara estratificação vertical dos três parâmetros em todas as estações, com um rebaixamento das isolinhas na estação T3. A entrada de água oceânica pelas camadas de fundo forma intensos gradientes verticais na coluna d'água, com a termoclina bem definida muito próxima à superfície na estação T5. Na figura 15b é possível visualizar a diminuição gradativa da temperatura na camada de fundo em direção ao oceano, assim como o aquecimento diurno da águas superficiais da plataforma, atingindo a temperatura máxima de 29.02°C na superfície da estação T9.

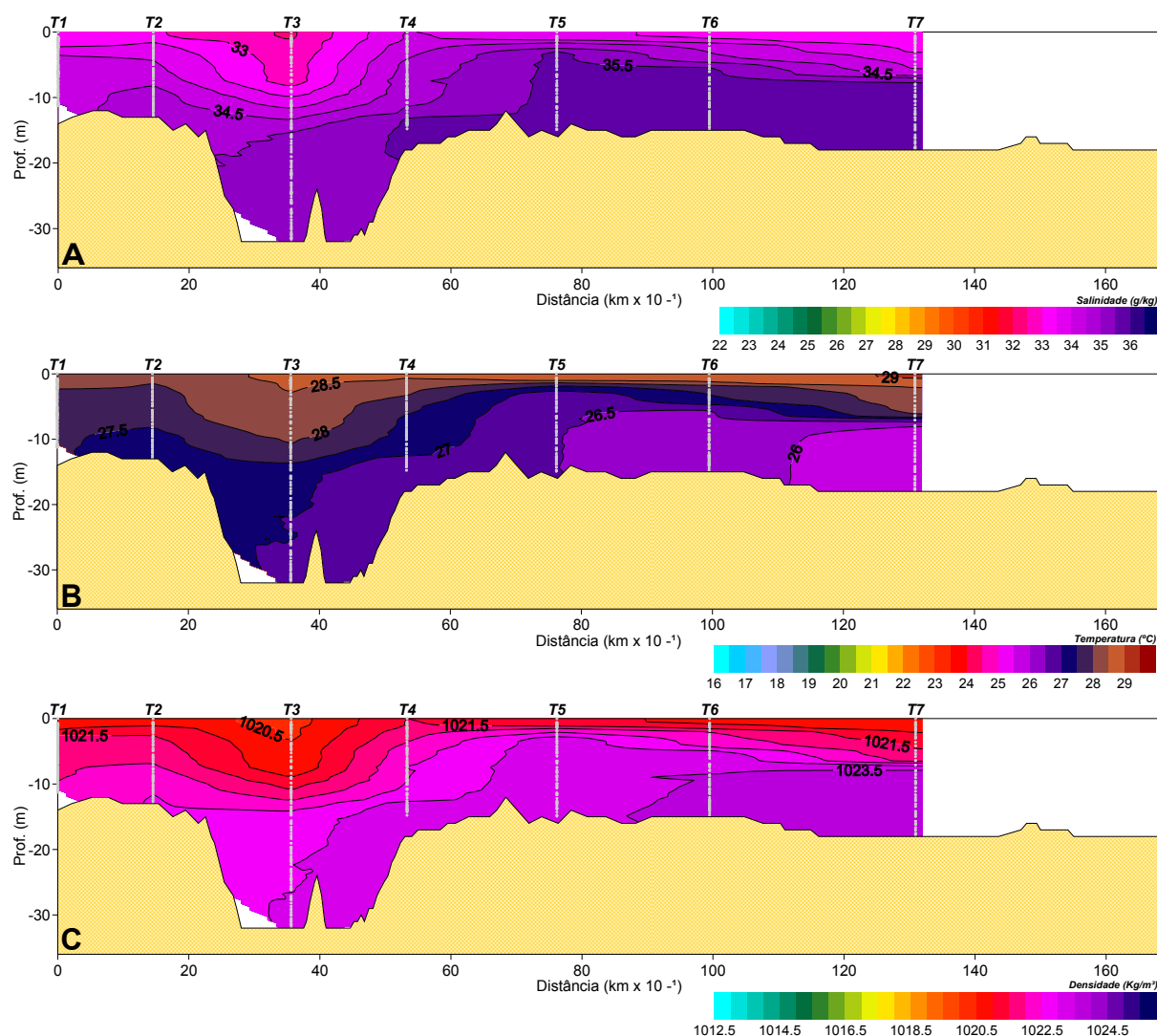


FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 05 DE MARÇO DE 2007

A campanha do dia 12 de março de 2007 teve início na estação T01 às 15h:24min e fim na estação T6 às 17h:00min. Este período compreendeu uma maré baixa de quadratura com pequena variação na altura neste dia (FIGURA 9). Dificuldades técnicas com a embarcação utilizada neste dia impediram a amostragem nas demais estações. A velocidade média do vento registrada para o período foi 4.5 m/s vindos do quadrante SE. A menor salinidade encontrada foi 28 g/kg na superfície da estação T1 e a maior, 35.8 g/kg, na camada de fundo da estação T6. Nos sete dias anteriores à campanha a pluviosidade total foi de 32.8 mm em Pontal do Sul e 60.2 mm em Antonina. A camada superficial apresenta um intenso gradiente horizontal de salinidade e densidade, com máxima variação entre as estações T2 e T3. Outra zona de variação horizontal pronunciada foi encontrada entre as estações T5 e T6. Estes pronunciados gradientes de densidade provavelmente são os responsáveis pela grande quantidade de pequenas frentes, estreitas faixas de espuma e material detrítico diverso, encontradas durante esta campanha. O maior gradiente vertical foi encontrado na estação T1, causado pela água menos salina, menos densa e mais quente que sai do estuário em forma de uma pluma superficial, diluindo-se gradativamente nas águas da plataforma. A camada de fundo apresenta a entrada de uma água fria e salina com limite de intrusão em direção à costa na estação T5 e intensos gradientes de temperatura entre as estações T5 e T6 (FIGURA 16).

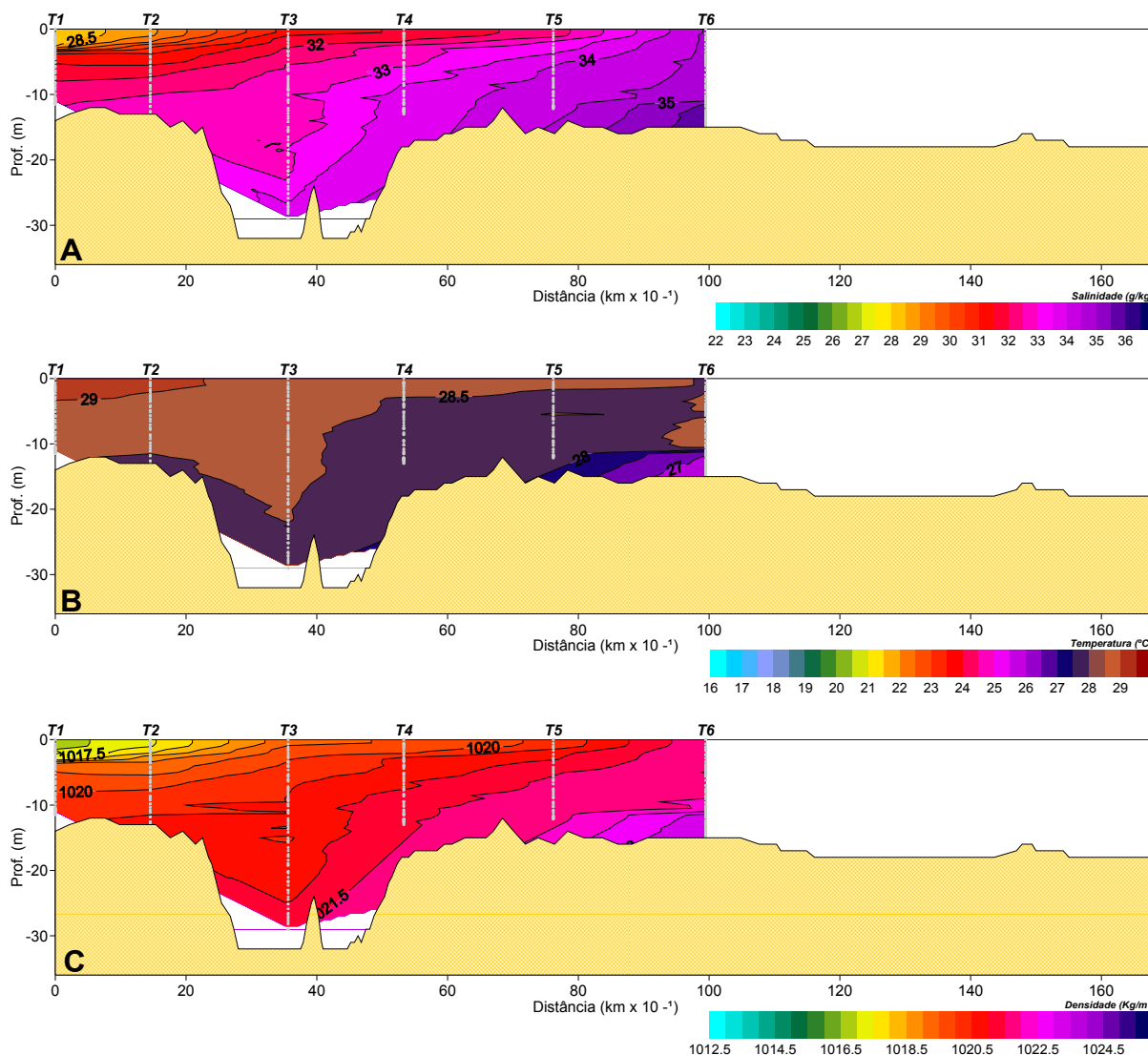


FIGURA 16 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 12 DE MARÇO DE 2007

A sexta campanha de campo foi realizada no dia 13 de março de 2007, e teve início na estação T1 às 7h:55min e final na estação T09 às 11h:26min. A maré no período da amostragem variou entre estufa de quadratura e início de enchente (FIGURA 17). O vento neste período variou do quadrante NE à NW com velocidades de 2.3 m/s à 0.9m/s respectivamente. A salinidade mínima foi de 21.7 g/kg e a máxima 36.2 g/kg. A pluviosidade total registrada nos sete dias anteriores à campanha foi 62.8 mm. em Pontal do Sul e 77.6 mm. em Antonina. Esta precipitação elevada nos dias anteriores à amostragem resultou em um intenso gradiente vertical de salinidade, que pode ser observado nas estações localizadas no interior do estuário. Na estação T1 verificou-se uma diferença de 10.7 g/kg entre a superfície e

o fundo. Pode-se notar a formação de uma pluma, de águas menos densas e salinas, que deixa o estuário pela camada superficial, claramente visível nas figuras 17a e 17c. Esta água menos densa ocupa praticamente os dez metros superficiais da coluna d'água nas estações T1, T2 e T3. A partir desta região a água estuarina começa gradativamente a ficar restrita à camada superficial, ficando restringida aos dois metros superficiais da coluna d'água entre as estações T6 e T7.

Nesta campanha foram visualizadas várias frentes de superfície, sendo que em duas delas, próximas às estações T2 e T7, foram feitas perfilagens amostrais antes e depois da linha de detritos. Na frente situada próxima à estação T2 é possível visualizar uma mudança nas isolinhas de densidade, que passam de horizontais a inclinadas e também uma região de águas de baixa salinidade, aprisionadas pela barreira de densidade, na superfície desta estação. A frente situada próxima à estação T7 marca o limite de deslocamento da pluma estuarina sobre as águas costeiras neste momento. Esta frente está posicionada a 9.5 km da desembocadura do estuário. Nas figuras 17a 17b é possível notar também a intrusão de águas mais frias e salinas, formando uma termoclina bastante pronunciada nas estações mais externas. Essas águas misturam-se gradualmente às águas circundantes, diminuindo sua salinidade e aumentando sua temperatura. Esse processo de intrusão é auxiliado pela maré enchente e pelos ventos favoráveis à ressurgência.

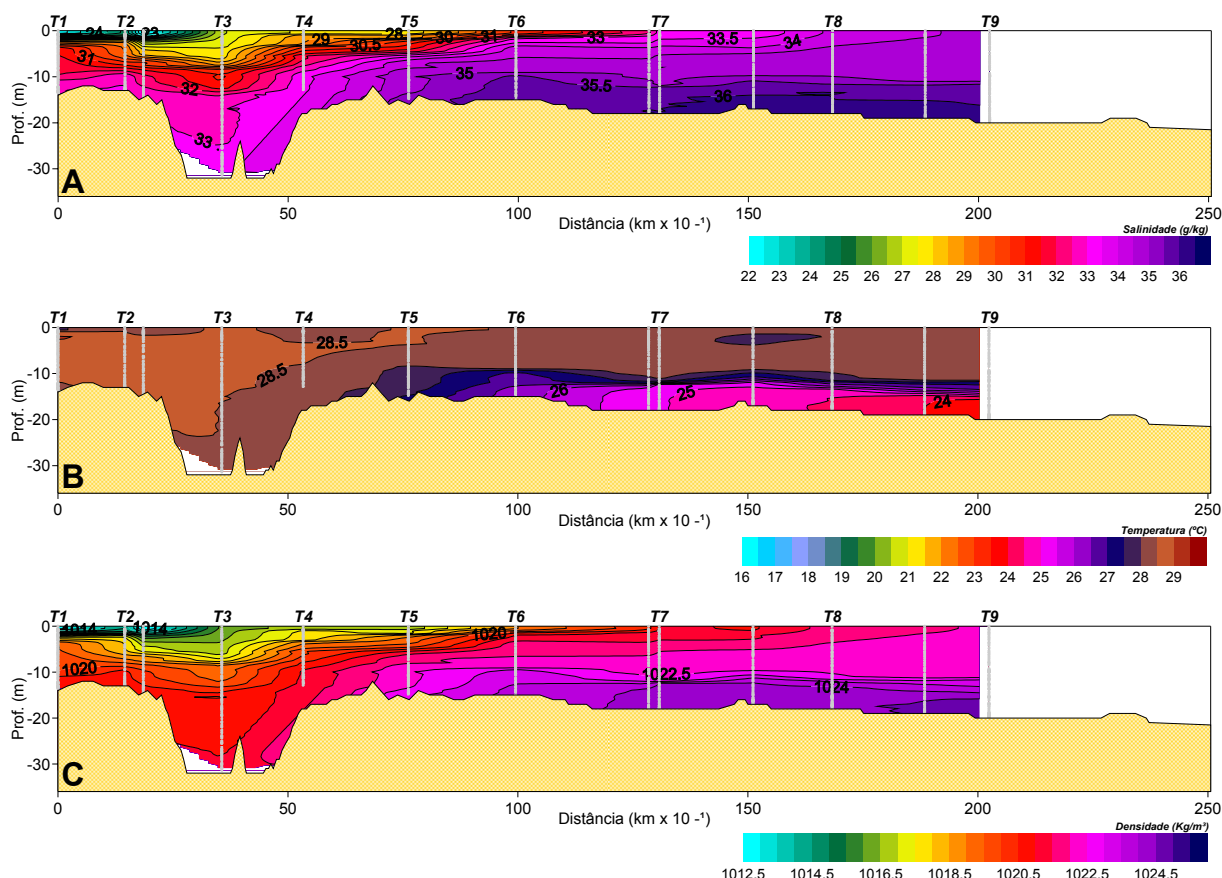


FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 13 DE MARÇO DE 2007

No dia 29 de março de 2007 foram realizadas duas campanhas, uma no final da maré enchente e outra no final da vazante. A variação da maré neste dia foi de 1.02 m (FIGURA 9). A primeira campanha teve início na estação T8 às 10h:56min e final na estação T1 às 12h:00min. Os ventos durante este período foram de SE com intensidade de 2.2 m/s. A segunda campanha teve início às 15h:21min na estação T1 e final às 16h:30min na estação T8. Durante este levantamento os ventos continuaram com direção SE, porém aumentaram sua intensidade para 4.2 m/s. A precipitação nos sete dias anteriores à campanha foi insignificante: apenas 3.5 mm em Antonina e nenhuma chuva registrada em Pontal do Sul.

A figura 18 mostra a estrutura hidrográfica da campanha realizada no dia 29 de março de 2007 durante a maré enchente. As salinidades máximas e mínimas encontradas foram 36.4g/kg e 32.6 g/kg, respectivamente. A menor na superfície da estação T4 e a maior na camada de fundo da estação T8. Nota-se uma estratificação vertical a partir da estação T3 em direção ao oceano, aumentando

com a distância da costa. Entre as estações T3 e T5 as isolinhas de temperatura, salinidade e densidade tornam-se mais inclinadas. Esse processo é mais acentuado na temperatura, onde as isotermas tornam-se verticais no meio da coluna d'água. Os dados de temperatura mostram uma termoclina bem desenvolvida entre 10 e 15 metros de profundidade nas estações T7 e T8. Esta termoclina fica cada vez mais superficial em direção à costa, atingindo a maior proximidade com a superfície na estação T5, com uma variação vertical de 2°C ocorrendo entre 1 e 3 metros de profundidade. Na camada superficial as temperaturas variam horizontalmente entre 28.3°C e 28.9°C, porém na camada de fundo essa diferença foi bem mais acentuada, variando entre 23.6°C e 28.1°C.

Provavelmente essa intrusão pronunciada de águas mais frias e salinas, se deva a dois fatores atuando juntos, um principal, que seria a predominância de ventos de NE favoráveis à ressurgência, atuando todas as tardes nos sete dias anteriores à campanha com intensidade média de 3.5 m/s, atingindo valores máximos de 6.8 m/s no dia 26 de março às 16:00h. Como fator secundário: a ausência de pluviosidade nos dias anteriores, consequentemente uma menor vazão de água de baixa salinidade na desembocadura do estuário, permitindo com que a cunha salina avance mais durante a maré enchente.

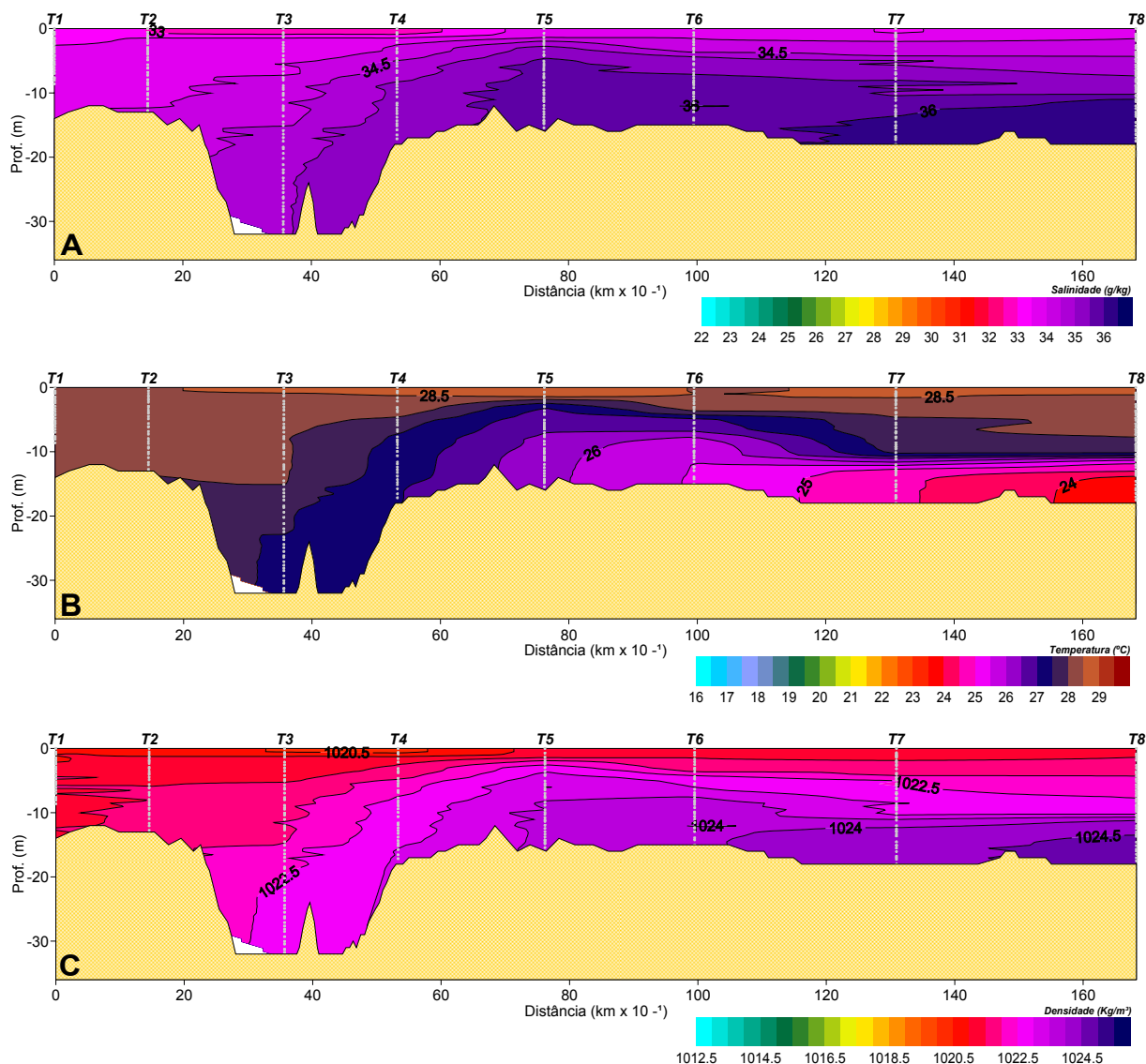


FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À PRIMEIRA CAMPANHA DO DIA 29 DE MARÇO DE 2007

A figura 19 mostra a estrutura hidrográfica do segundo levantamento realizado dia 29 de março de 2007, durante a maré vazante. A menor salinidade, 30.7 g/kg, foi encontrada na superfície da estação T1 e a maior, 36.1 g/kg, na estação T8 na profundidade de 18 metros. Nota-se um recuo da frente salina em relação à campanha anterior, realizada durante a maré enchente. A isohalina 35 g/kg sofre um recuo, não só horizontal, de aproximadamente 3.2 km, mas também vertical, passando, na estação T5 da profundidade 2.7 m para 12m. A camada superficial, entre as estações T1 e T4 é ocupada por águas com salinidades abaixo de 32 g/kg, que deixa o confinamento do estuário. Essa lente de água salobra tem 2.5 metros de espessura na estação T1 passando a 1 metro na estação T2,

permanecendo com essa espessura até a estação T4. Na estação T5 não são encontradas salinidades superficiais menores que 33.1 g/kg.

Com exceção da estação T5, todas as temperaturas superficiais tiveram um acréscimo médio de 0.4°C, entre as duas campanhas do dia 29 de março, causado pelo aquecimento solar. A superfície da estação T8 teve o maior aquecimento, 0.88 °C. A redução de 0.47°C observada na superfície da estação T5, provavelmente se deva à perda de calor por condução, com as águas mais frias que se encontravam muito próximas à superfície nesta estação durante o primeiro levantamento neste mesmo dia. Este aquecimento pela radiação solar propicia o aparecimento de mais uma termoclina próxima à superfície, nitidamente visível nas estações T7 e T8 (FIGURA 19b).

Na figura 19c, é interessante observar as mudanças nas isolinhas de densidade. Enquanto nas estações localizadas na plataforma (T5 a T8) e no interior do estuário (T1 a T3) as isolinhas são praticamente horizontais, com pequena inclinação entre as estações T6 e T7, na região entre as estações T3 e T5 elas se encontram bastante inclinadas, indicando que nesta região estão ocorrendo os processos mais intensos de mistura de propriedades.

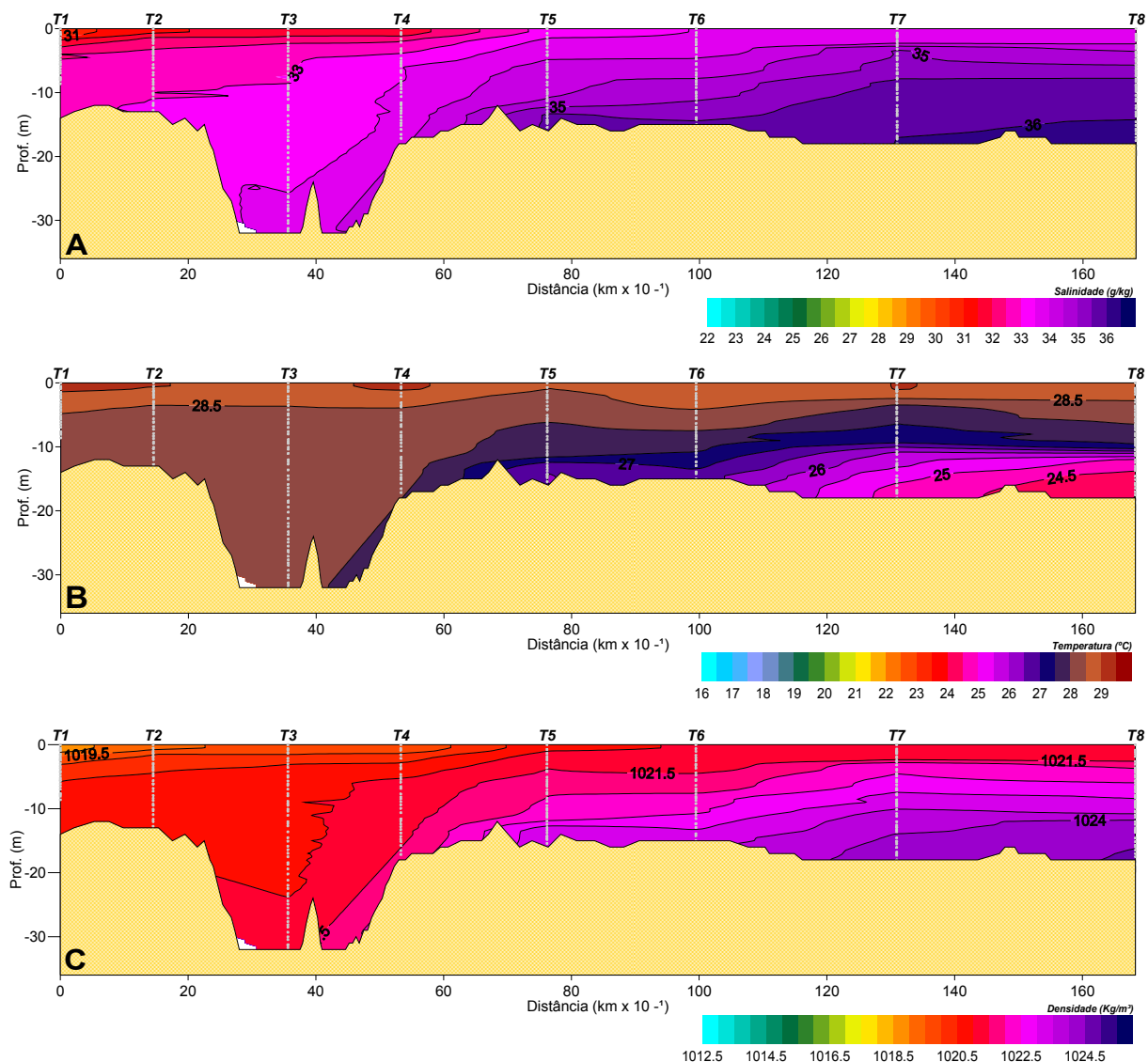


FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À SEGUNDA CAMPANHA DO DIA 29 DE MARÇO DE 2007

A campanha do dia 30 de março de 2007, devido a algumas dificuldades técnicas, foi dividida em duas partes, o primeiro levantamento teve início às 11h:26min da manhã no ponto T8 e fim às 11h:55min no ponto T4. A segunda etapa do levantamento foi iniciada no ponto T1 às 14h:33min e finalizada às 14h:48min no ponto T4. Durante a primeira campanha a maré encontrava-se em final de enchente em um momento de transição entre maré de sizígia e quadratura. A segunda campanha foi realizada no início da vazante deste mesmo ciclo de maré (FIGURA 9).

Apesar de serem complementares espacialmente, é importante ressaltar que existe uma descontinuidade temporal entre as duas etapas de quase três horas.

Entretanto uma mesma representação gráfica (FIGURA 20) integra os dois conjuntos de dados apenas com o intuito de facilitar a visualização.

No início da campanha os ventos eram de NW com intensidade de 1.7 m/s passando a NE e depois SE com velocidades de 2.5 m/s e 4.1 m/s, respectivamente. Não houve precipitação nos sete dias anteriores ao levantamento.

As condições ambientais (vento, maré, pluviosidade e temperatura do ar) foram muito parecidas à da primeira campanha do dia anterior, fazendo com que a estrutura hidrográfica se apresentasse muito semelhante, com o mesmo processo de intrusão de águas frias e salinas, chegando a influenciar a temperatura superficial na estação T5, deixando as temperaturas 0.9°C menores que a superfície das estações vizinhas T6 e T4. Isso diminuiu o gradiente da termoclina nesta estação em comparação ao dia anterior. Já a camada de fundo apresentou um aumento no gradiente horizontal de temperaturas, sendo 22.4°C a mínima registrada na camada de fundo da estação T8. Neste ponto a variação vertical de temperaturas chegou a 6.25°C. Como resultado da ausência de chuvas nos dias anteriores e da mistura da água estuarina com as águas salgadas que adentram a baía com a maré, a menor salinidade encontrada na segunda parte da campanha, entre os pontos T1 e T4, foi 32.8 g/kg, estando a água doce já bem diluída ao deixar o estuário, ao menos nessa condição de maré.

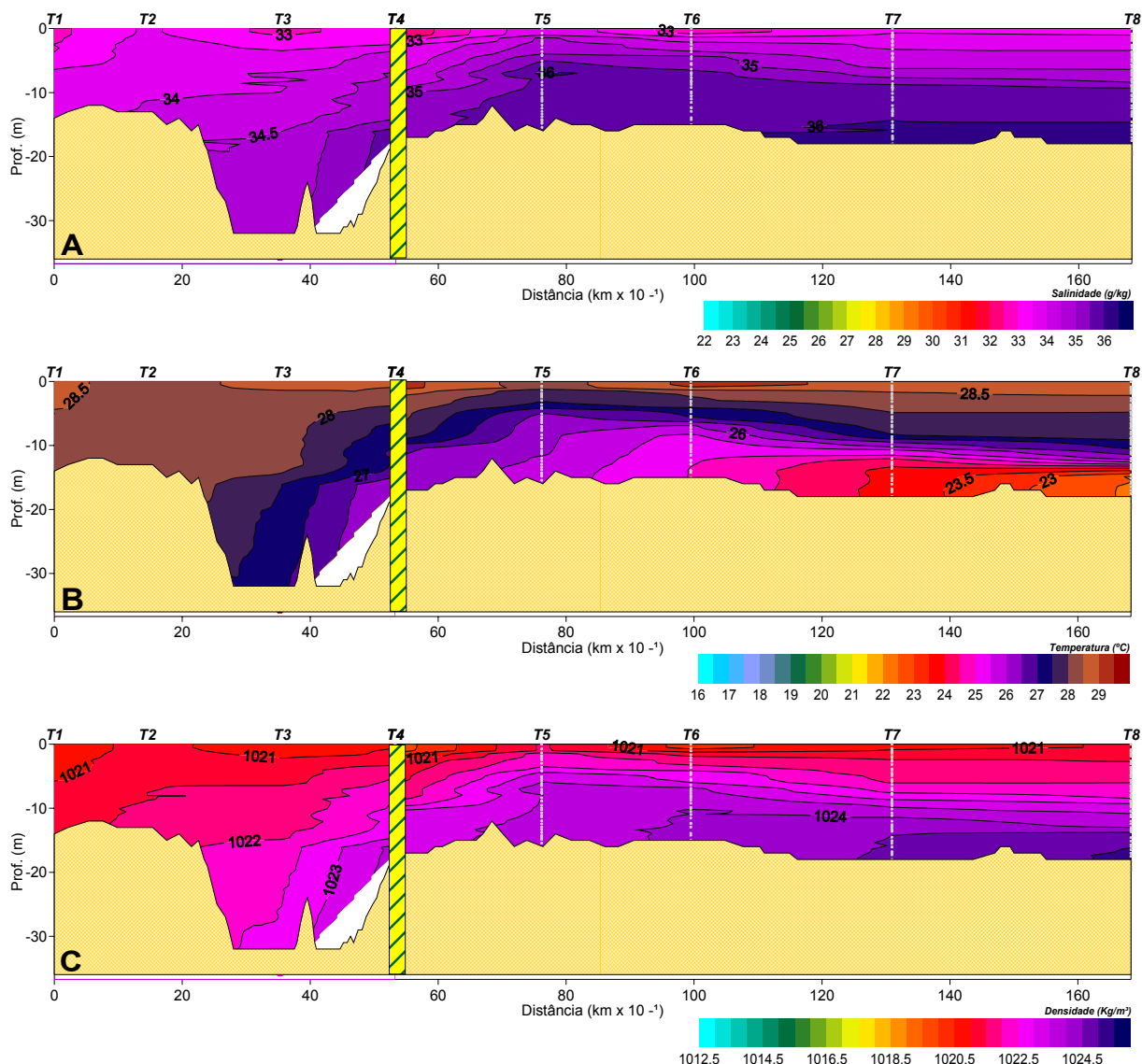


FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE ÀS DUAS CAMPANHAS DO DIA 30 DE MARÇO DE 2007

A campanha do dia 31 de março teve início às 09h59min na estação T8 e final na estação T1 às 10h:52min. O levantamento foi realizado em maré enchente de sizígia (FIGURA 9). A salinidade mínima encontrada foi de 32.2 g/kg na camada superficial do ponto T4 e a máxima de 36.3 g/kg na camada de fundo da estação T8. Durante a aquisição dos dados, o vento apresentou velocidade média de 1.5 metros por segundo e direção variando entre oeste e nordeste. Não houve precipitação significativa nos sete dias anteriores à campanha, tendo sido registrado somente 3.4 m. de chuva na estação de Antonina.

A representação gráfica desta campanha (FIGURA 21) permite observar a entrada das águas mais frias e salinas da plataforma continental nas camadas de

meio e fundo, ficando muito próximo à superfície nas estações T7 e T6, chegando a aflorar na estação T5. Devido a essa intrusão salina, é possível observar gradientes acentuados, tanto horizontais quanto verticais de salinidade, e principalmente, de temperatura entre as estações T3 e T8. A variação horizontal das temperaturas na camada de fundo entre as estações T1 e T8 é de 6.65°C . No ponto T8 a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo é de 6.8°C . Na estação T5 a termoclina, a pycnoclina e a haloclina encontram-se muito próximas à superfície. Esta densidade elevada na superfície da estação T5 pode ser a responsável pelo aprisionamento da água superficial menos salina encontrada na superfície da estação T4. O gradiente horizontal de densidade entre as estações T8 e T6 é praticamente homogêneo, com uma pequena inclinação nas camadas intermediárias. Já entre as estações T5 e T3 as isolinhas de temperatura salinidade e densidade apresentam uma inclinação mais acentuada. Nas estações T2 e T1 toda a coluna d'água encontra-se bem misturada.

É interessante notar a semelhança dos dados obtidos nesta campanha com os dados dos dias anteriores, mostrando uma continuidade temporal na escala analisada, de intrusão de águas mais frias e salinas favorecidas pelo regime de ventos de NE contínuos durante as últimas tardes.

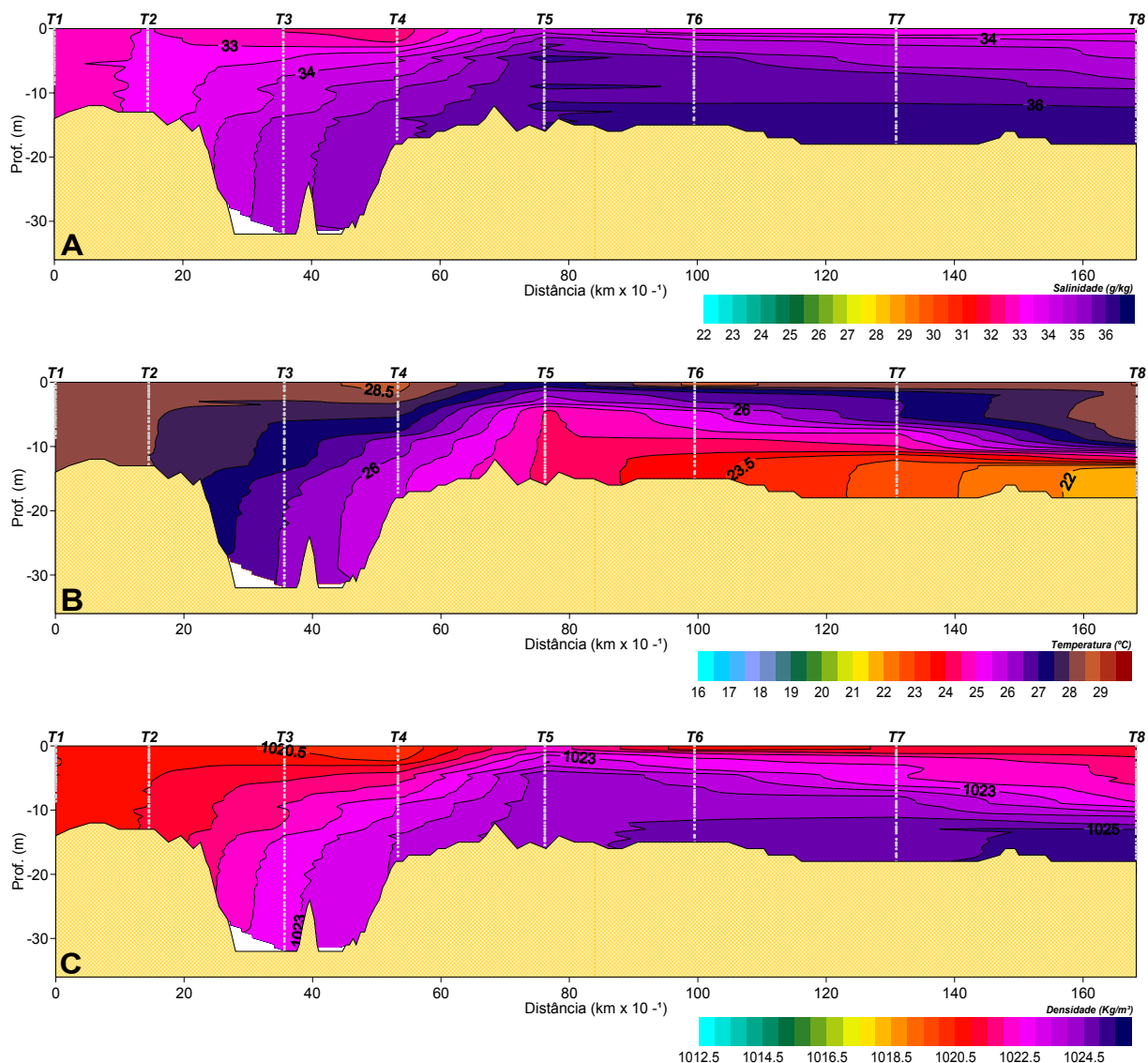


FIGURA 21 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 31 DE MARÇO DE 2007

A campanha realizada no dia 1º de abril de 2007 teve início no ponto T1 às 12h:47min e término na estação T6 às 13h:32 min. No momento da amostragem a maré encontrava-se no final da enchente de sizígia (FIGURA 9). Os ventos neste momento tinham direção SW e intensidade de 4.9 m/s. Não houve precipitação registrada em nenhuma das duas estações nos sete dias anteriores à campanha. A menor salinidade, 34.3 g/kg foi encontrada na superfície da estação T6 e maior, 35.9 g/kg, na camada de fundo da mesma estação.

Neste levantamento a coluna d'água esteve bem misturada, com pequena variação vertical nas estações T5 e T6, devido à presença de águas mais salinas e frias detectadas na camada de fundo destas estações (FIGURA 22). Na comparação

com os levantamentos anteriores esta campanha foi a única a apresentar ausência de estratificação em quase todos os perfis, apenas com leves variações verticais na temperatura.

Essa mistura da coluna d'água está relacionada à incidência de ventos de direção sul. Na estação meteorológica de Pontal do Sul, os ventos viraram de nordeste para sul às 20:00h do dia 31 de março e permaneceram com esta direção até o momento da conclusão da campanha, com velocidade média de 5.6 m/s e picos de máximos de 9.3 m/s durante a madrugada do dia 1º de abril.

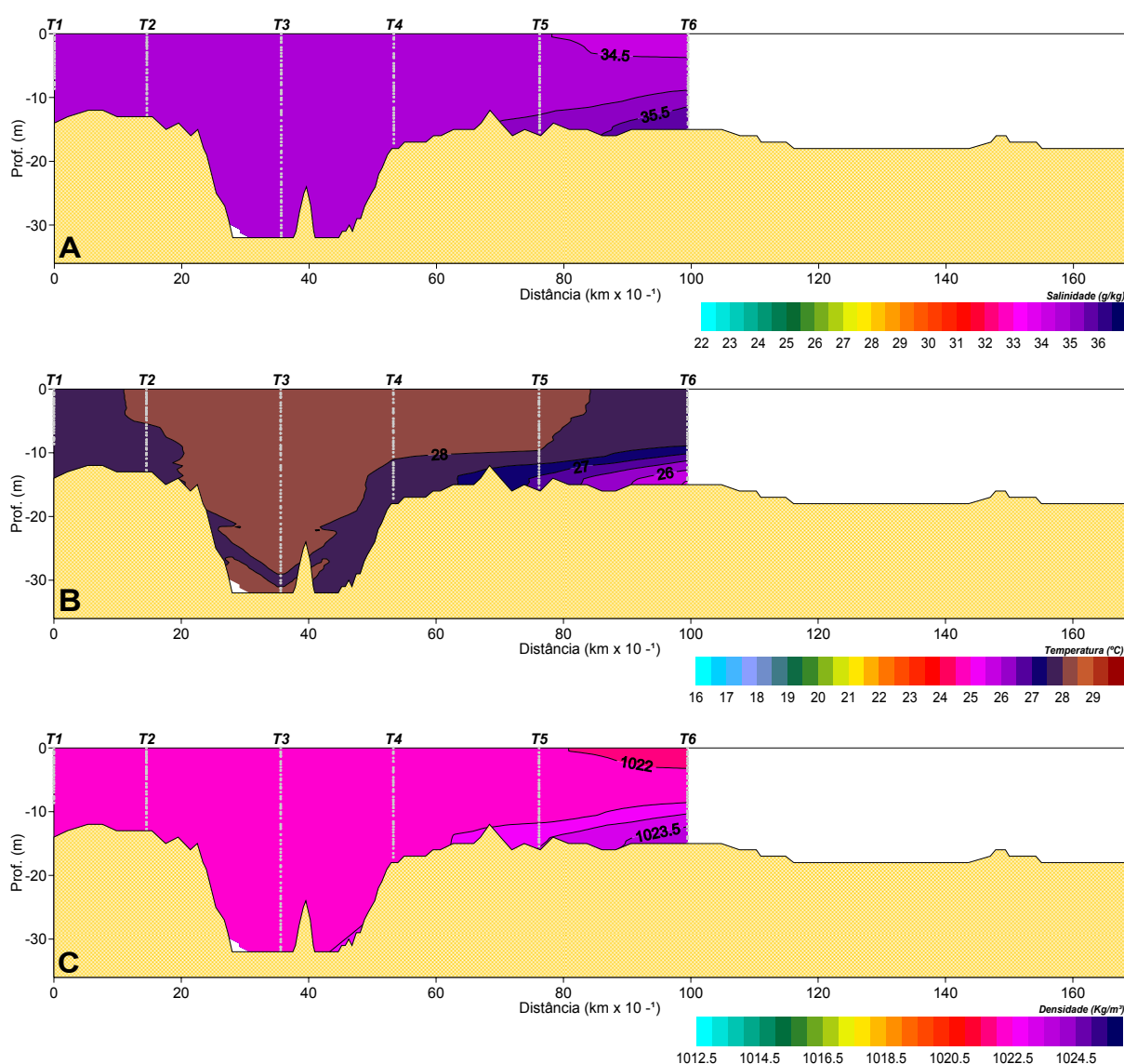


FIGURA 22 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 01 DE ABRIL DE 2007

A campanha do dia 02 de abril de 2007 teve início na estação T1 às 09h:07min e fim na estação T7 às 09h:44min. A maré era de sizígia e encontrava-se neste momento bem no início da enchente (FIGURA 9). Durante os trabalhos de campo os ventos foram de SW com intensidade de 3.6 m/s. Houve 8 mm de chuva registrada em Antonina entre 31 de março e 2 de abril, não havendo registro para o período de sete dias anteriores em Pontal do Sul. A menor salinidade encontrada foi 30.8 g/kg na superfície da estação T1, e a maior foi 36.15 g/kg, no fundo da estação T7.

A estrutura salina apresentou o maior gradiente horizontal entre as estações T5 e T6 em toda a coluna d'água. As isolinhas de salinidade e temperatura apresentam-se bem inclinadas da estação T1 às proximidades da estação T6. Nas estações T7 e T6 a coluna d'água está bem misturada nos 10 metros superiores da coluna d'água. A camada de fundo das duas estações mais distantes da costa está ocupada por uma água mais fria e salina, com uma termoclina bem definida próxima ao fundo na estação T7 (FIGURA 23).

A estratificação mais acentuada em relação à campanha do dia anterior pode ser atribuída às seguintes causas: o momento da maré, que permitiu a saída de águas menos densas do estuário, mesmo não havendo uma precipitação significativa nos dias anteriores isso provavelmente se deva às águas do lençol freático que permanecem muito próximo à superfície nesta época do ano. Evidências apontam que a água subterrânea tem contribuição significativa para a descarga total na baía de Paranaguá e para a formação das correntes residuais (Marone et al, 1997, 2005). Outro fator que contribuiu para a estratificação foi a diminuição da intensidade dos ventos em comparação ao dia anterior.

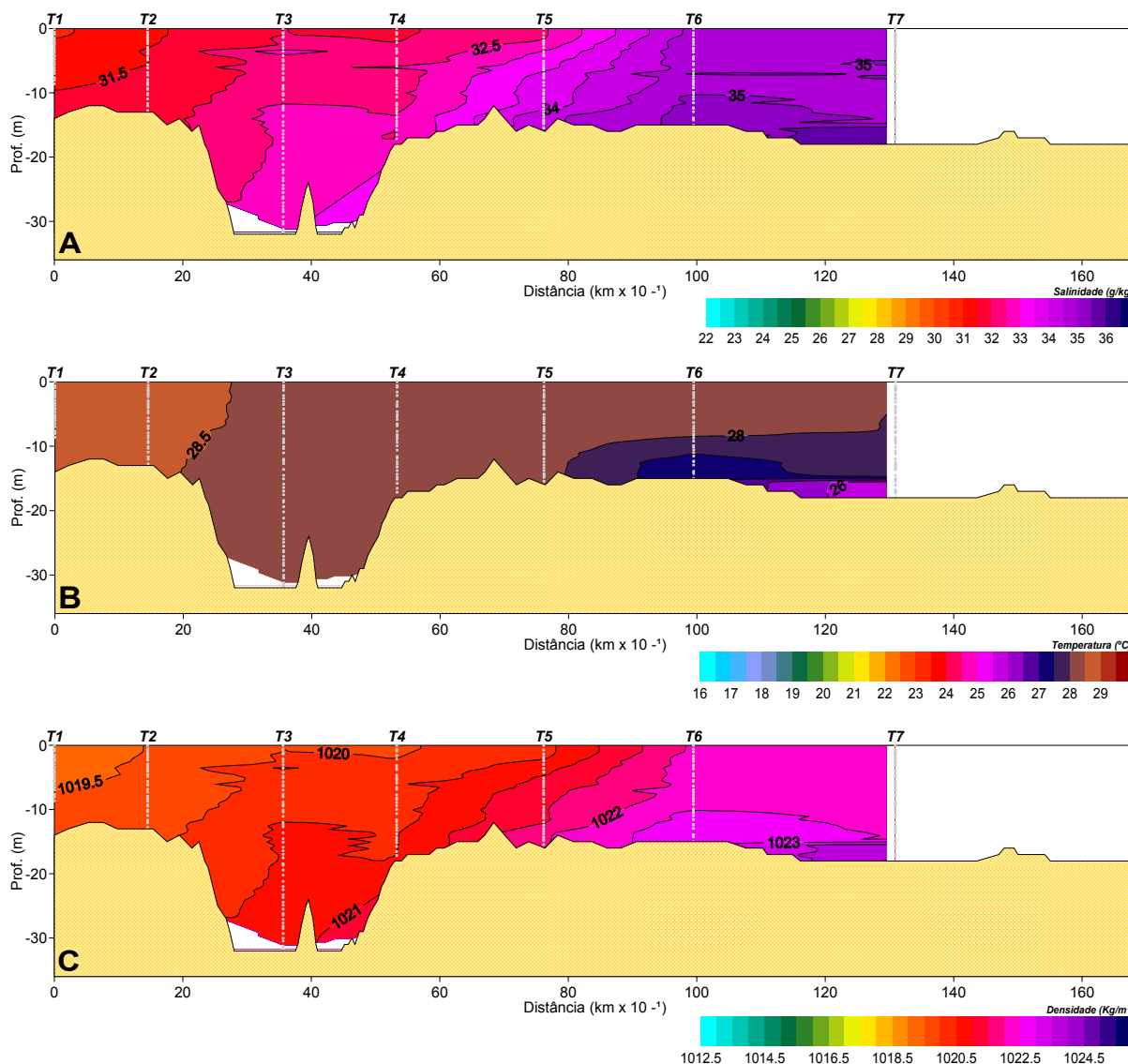


FIGURA 23 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 02 DE ABRIL DE 2007

No dia 03 de abril de 2007, foram realizadas duas campanhas amostrais. A primeira, com início no ponto T1 às 08h:44min e final na estação T6 às 09h:14min ocorreu durante a estufa de maré baixa de sizígia (0.7m)(FIGURA 9). A segunda teve início às 13h:40min na estação T1 e final às 14h:33min na estação T6, sendo realizada ao final da maré enchente (2.16 m). A diferença na altura da maré entre os dois levantamentos foi de 1.46 m. Durante a manhã do dia do levantamento os ventos eram de SW com intensidade de 2.1 m/s, passando a NE, com intensidade de 4.5 m/s, no início da tarde. Não houve precipitação nos sete dias anteriores em Pontal do Sul e em Antonina o valor acumulado foi 46.2 mm, sendo que 32 mm ocorreram na noite anterior. Na primeira campanha, a salinidade variou entre 30.9

g/kg e 35.2 g/kg, não havendo estratificação salina vertical em nenhuma estação. As temperaturas também variaram pouco com diferenças entre a máxima e a mínima de 1.7°C. Pode-se notar um gradiente horizontal de propriedades com a maior variação sendo observada entre as estações T5 e T6 (FIGURA 24).

Com a subida da maré é possível notar, nos dados da segunda campanha deste dia, um aumento significativo da estratificação vertical, principalmente entre as estações T5 e T8. Com a intrusão de águas mais frias e salinas pela camada de fundo, forma-se uma termoclina bem definida e sem variações verticais em sua posição entre as estações T5 e T8. O gradiente horizontal de temperaturas na camada de fundo variou 0.6°C entre as estações T1 e T4 e 2.6 °C entre as estações T5 e T8. É interessante notar a formação de uma segunda termoclina logo abaixo da camada superficial nas estações localizadas fora do estuário, devido ao aquecimento solar desta camada durante o dia. A temperatura superficial máxima, 29.16°C foi encontrada na estação T6 (FIGURA 25).

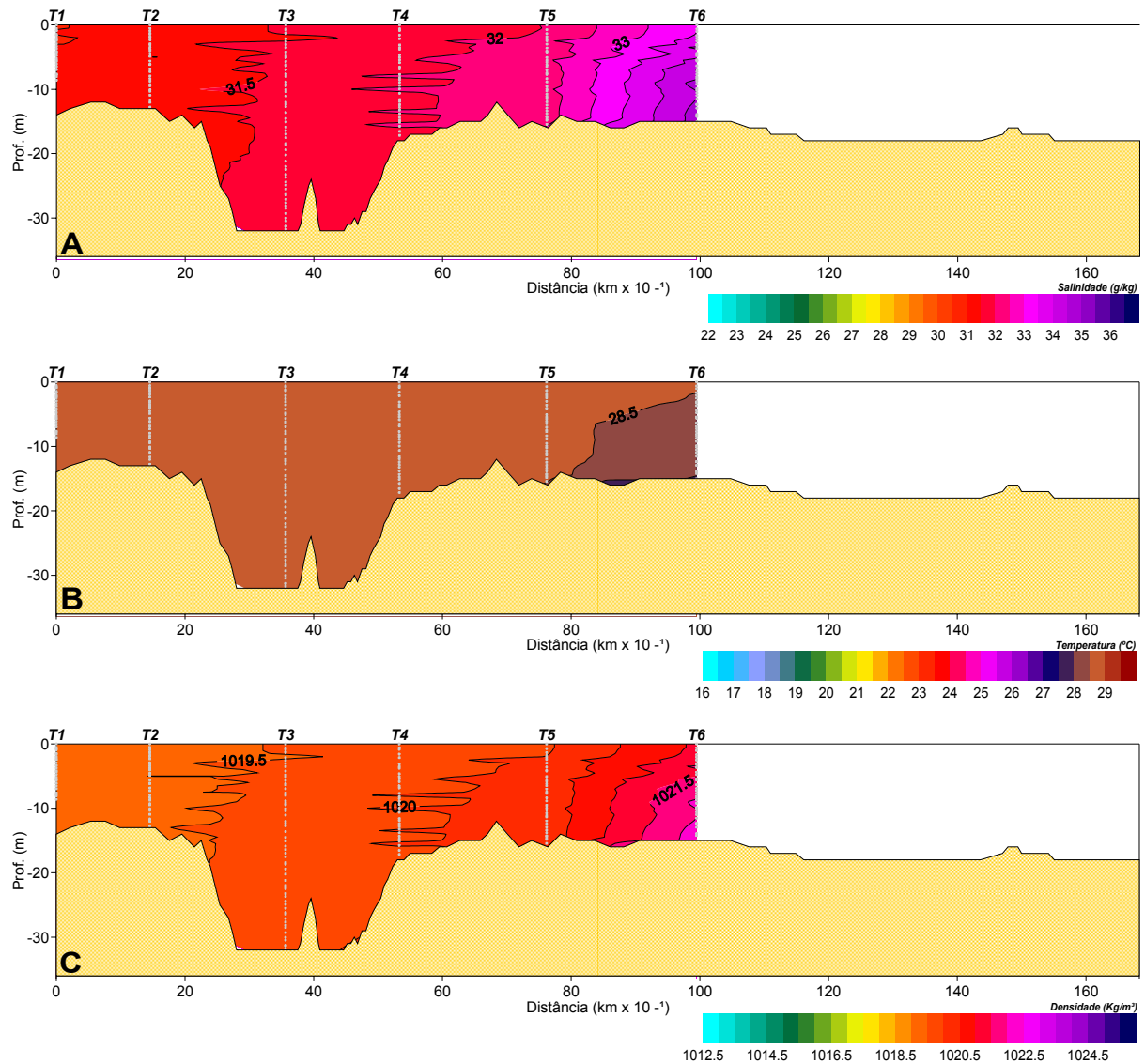


FIGURA 24 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À PRIMEIRA CAMPANHA DO DIA 03 DE ABRIL DE 2007

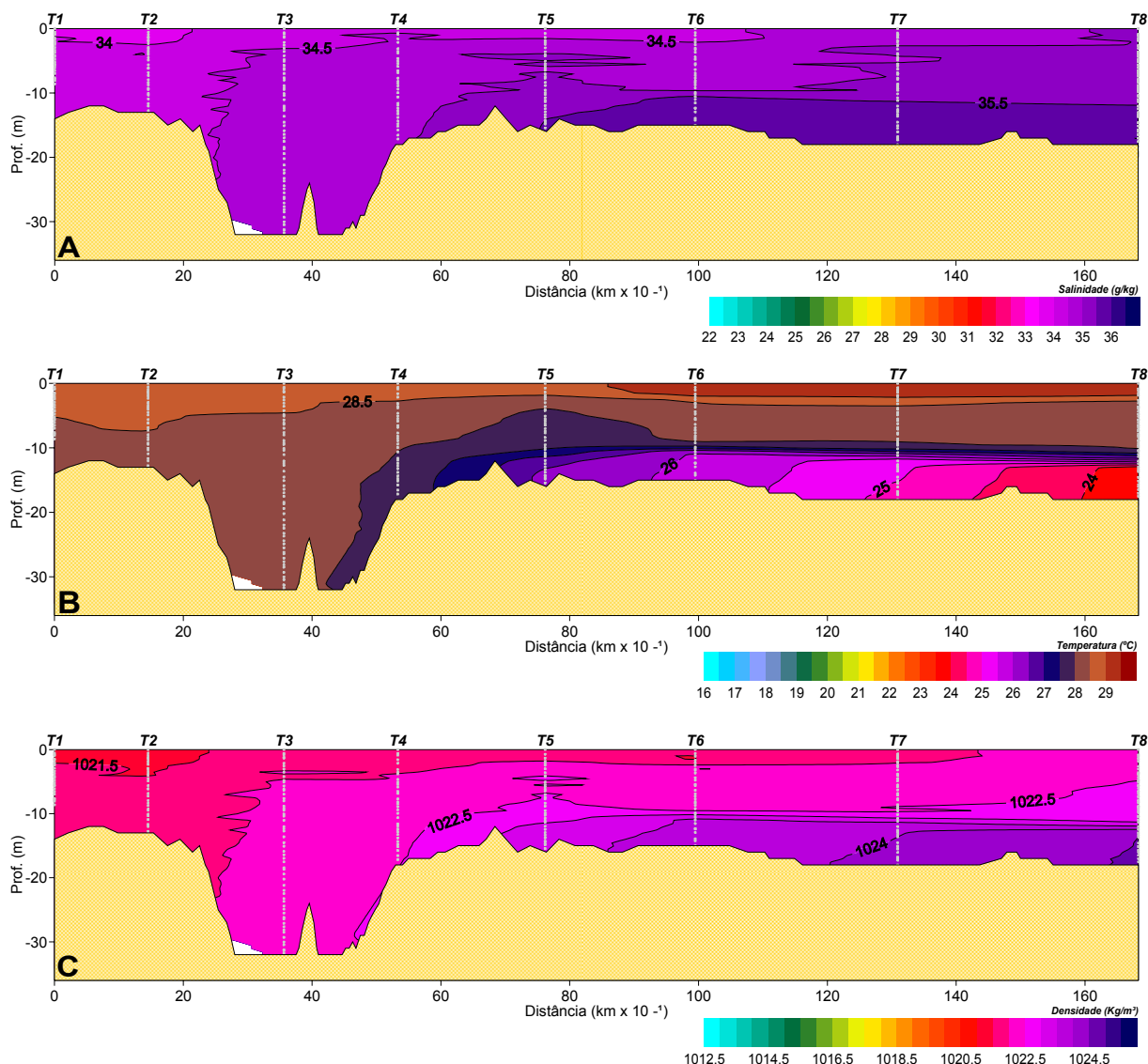


FIGURA 25 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À SEGUNDA CAMPANHA DO DIA 03 DE ABRIL DE 2007

A campanha do dia 04 de abril de 2007 teve início na estação T8 às 11h:27min e término na estação T1 às 12h:34min, tendo sido realizada durante a maré enchente de sizígia (FIGURA 9). Durante o levantamento os ventos tinham direção SW com 3.5 m/s de intensidade. A análise da precipitação nos sete dias anteriores mostra um registro de 16.4mm de chuva em Pontal do Sul, concentrada na noite anterior à amostragem. Em Antonina a pluviosidade total foi de 49.6 mm, sendo que 41.4 mm ocorreram nas 48 horas que antecederam a campanha.

A menor salinidade encontrada foi 33 g/kg na camada superficial da estação T3 e a maior foi 36.1 g/kg na camada de fundo da estação T8. A figura 26 mostra que a coluna d'água ao longo do transecto neste momento encontrava-se bem

misturada, ocorrendo estratificação vertical apenas na camada de fundo das estações T7 e T8 devido à presença de águas mais densas, com características TS situadas no limite entre a água tropical e de plataforma, indicando uma mistura dessas duas massas d'água. Também é possível visualizar, entre as estações T1 e T3, uma fina camada de menor densidade na superfície. Com exceção da camada de fundo entre estações T6 e T8 todas as temperaturas estão acima dos 28°C.

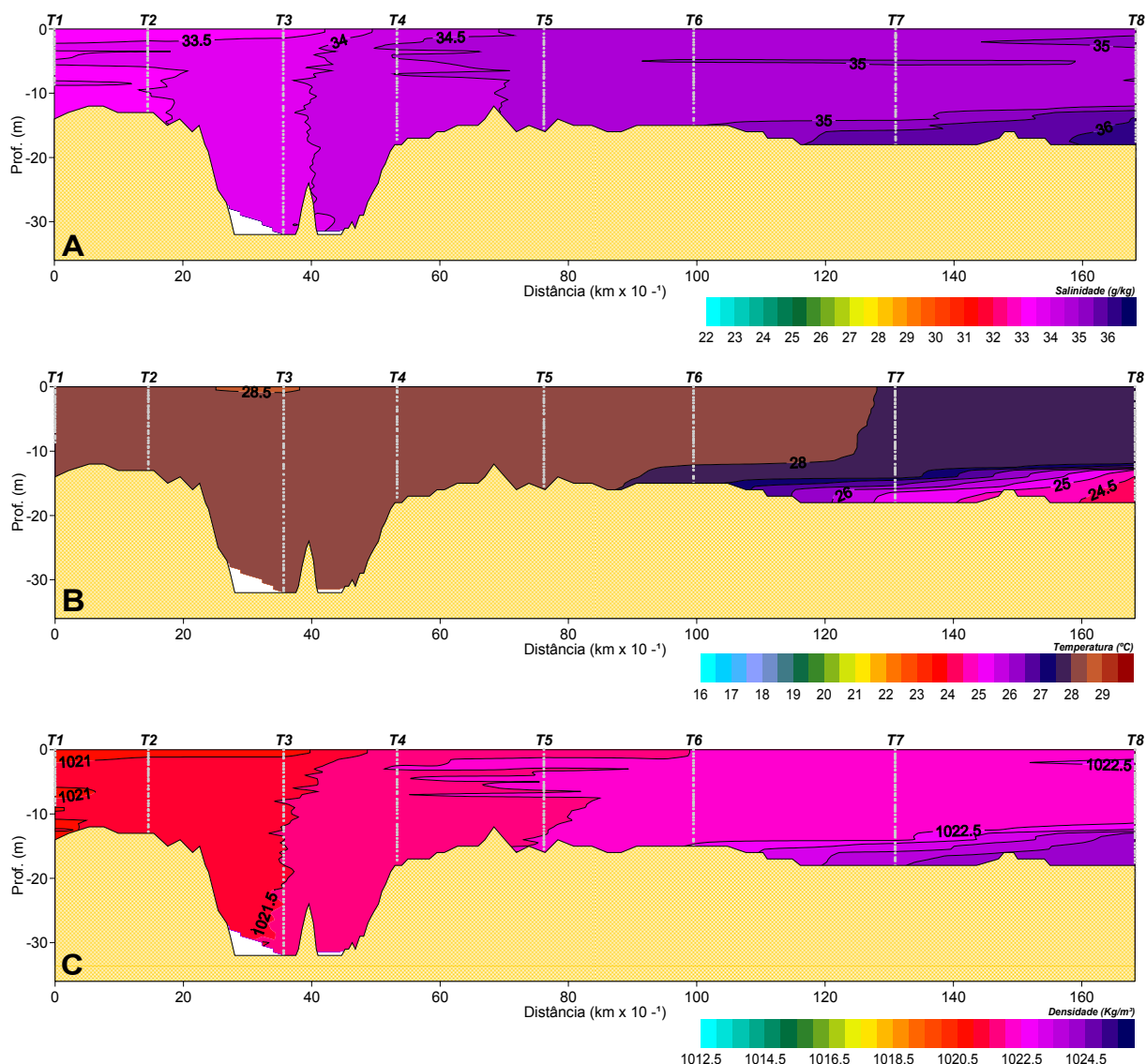


FIGURA 26 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 04 DE ABRIL DE 2007

No dia 05 de abril, a campanha de amostragem teve início na estação T8 às 11h:11min, sendo finalizada na estação T2 às 11h:58min. A maré encontrava-se em início de enchente no final do período de sizígia (FIGURA 9). O vento tinha direção

SE com 4.9 m/s de intensidade. Para os sete dias anteriores à campanha registrou-se uma pluviosidade de 16.4mm em Pontal do Sul e 51.2 mm em Antonina. A menor salinidade encontrada foi 32 g/kg na camada superficial da estação T2 e a maior foi 35.7 g/kg na camada de fundo da estação T8.

A figura 27 mostra que durante esta campanha a coluna d'água ao longo do transecto encontrava-se verticalmente bem misturada, apresentando gradientes verticais um pouco mais pronunciados apenas na superfície entre as estações T1 e T4, e na camada de fundo entre as estações T7 e T8. Pode-se notar o sinal de uma mancha de águas menos salinas do que as águas circundantes na superfície da estação T6. Provavelmente isso se deva a resquícios de água estuarina que saíram do estuário durante a maré vazante anterior à amostragem e ficaram retidas nesta região.

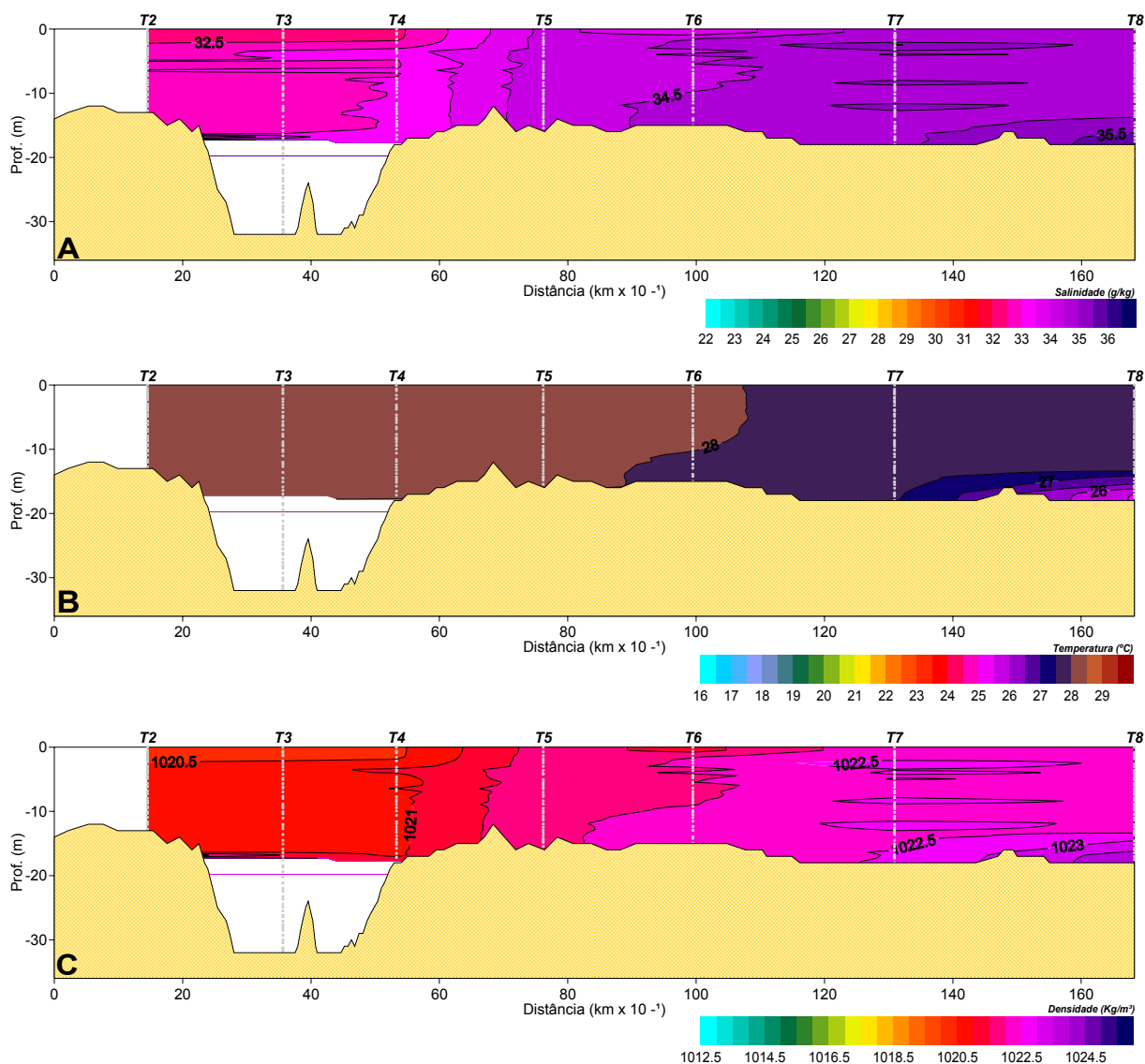


FIGURA 27 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 05 DE ABRIL DE 2007

Durante a campanha do dia 09 de abril de 2007, foram amostradas somente as estações T1, T4 e T6. A amostragem foi iniciada na estação T1 às 9h:14min e finalizada na estação T6 às 9h:39min. A maré neste momento era de quadratura e estava praticamente sem variação (FIGURA 9). O vento era SW com intensidade de 1.8 m/s. A pluviosidade acumulada nos sete dias anteriores foi de 33.6mm em Pontal do Sul e 65.2 mm em Antonina.

A salinidade variou entre 33.1 g/kg na estação superfície da estação T1 e 35.3 g/kg na camada de fundo da estação T6. A coluna d'água esteve bem misturada, praticamente sem estratificação, nos três perfis amostrados. A temperatura média da coluna d'água foi 26.92 °C, com máxima de 27.03°C e mínima de 26.71°C (FIGURA 28). Em comparação com a campanha anterior, realizada no dia 05 de abril, a temperatura máxima teve um decréscimo de 1.18°C e a temperatura média um decréscimo de 0.91°C. Ao comparar apenas os dados dos perfis coincidentes (estações T4 e T6) a temperatura média da água no dia 09/04/07 apresenta-se 1.24°C menor que no dia 05/04/07. A temperatura máxima também apresenta redução de 1.22°C. Esta redução da temperatura média da água está relacionada com as condições atmosféricas nos dias anteriores às amostragens, que teve uma queda significativa na temperatura média do ar, acompanhada de um aumento na pressão atmosférica e na intensidade dos ventos.

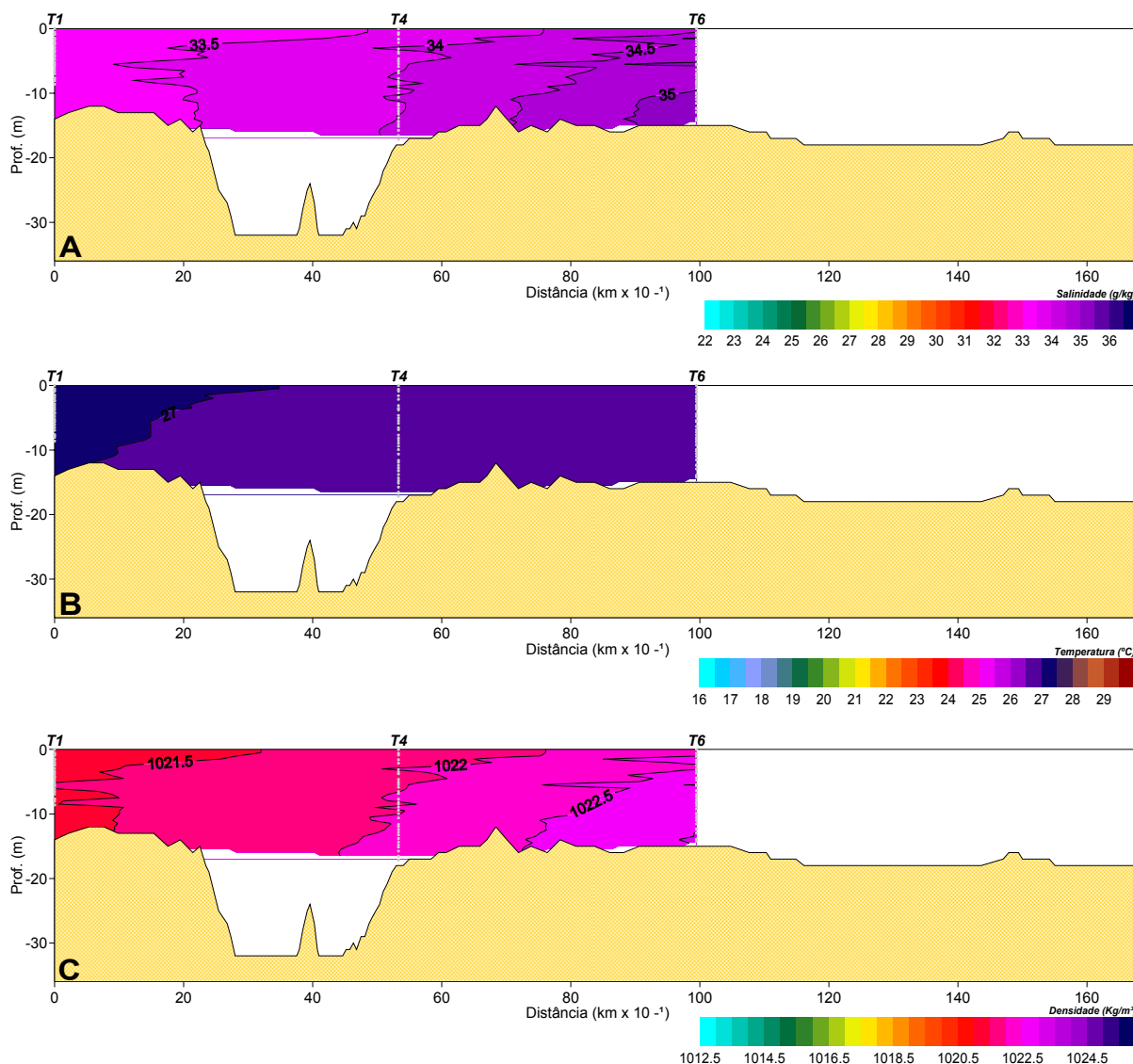


FIGURA 28 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 09 DE ABRIL DE 2007

A campanha do dia 10 de abril de 2007 teve início na estação T1 às 08h:44min e término na estação T8 às 9h:42min. A maré no momento da amostragem era de quadratura, com altura de 1.9m, estando praticamente parada durante o levantamento. A campanha foi precedida por uma maré vazante (FIGURA 9). Os ventos eram SW com intensidade de 2.6 m/s. A pluviosidade acumulada nos sete dias anteriores foi de 42.6mm em Pontal do Sul e 27.2 mm em Antonina. A menor salinidade encontrada foi 31.6 g/kg na superfície da estação T1 e a maior foi 35.7 na profundidade de 3 metros na estação T8.

Pode-se perceber através da análise da figura 29, que a coluna d'água encontra-se parcialmente misturada, com a exceção da estação T6, que exibe um gradiente vertical de salinidade um pouco mais acentuado, e das estações T1 e T2,

onde se pode perceber a existência de uma camada superficial de água menos salina. As isolinhas de densidade apresentam uma tendência de inclinação mais acentuada próximas à superfície entre as estações T1 e T6, resultado da presença de uma água menos salina nas camadas superficiais destas estações. Entre as estações T1 e T6 as temperaturas estão ligeiramente mais elevadas em direção ao fundo, efeito este que é mais pronunciado na estação T6. Isso provavelmente ocorreu devido à influência de águas estuarinas que chegaram à região da desembocadura com a maré vazante durante as primeiras horas da manhã e teriam sofrido perda de temperatura maior durante a noite do que as águas da plataforma. Esse efeito é mais pronunciado na estação T1, onde a água superficial encontra-se 0.28° mais fria que a camada situada quatro metros abaixo.

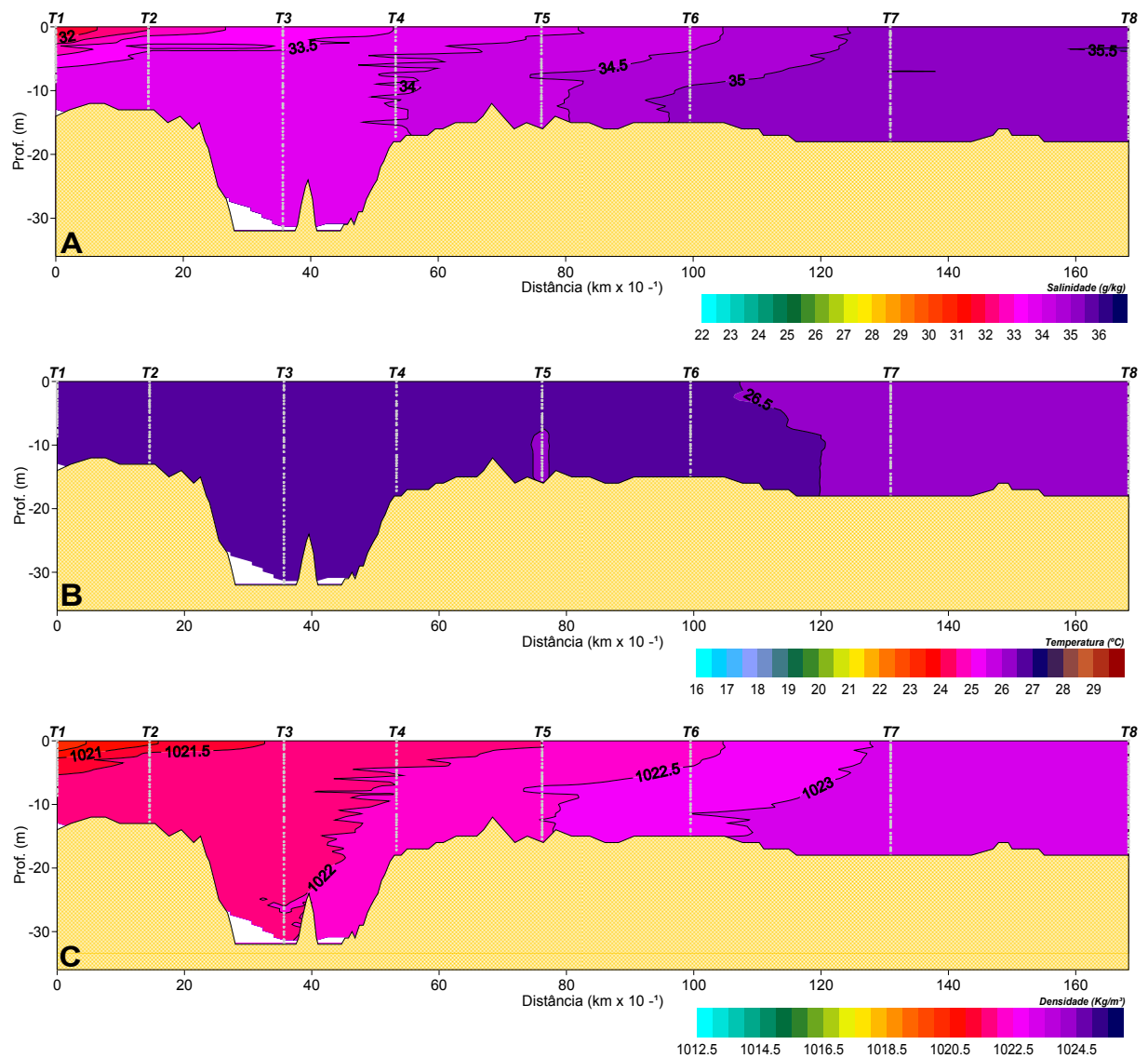


FIGURA 29 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 10 DE ABRIL DE 2007

No dia 11 de abril de 2007 foram realizadas duas campanhas de amostragem. A primeira teve início na estação T7 às 09h58min e final na estação T1 às 10h:30min, no final da maré enchente de quadratura. A segunda teve início na estação T8 às 14h12min e final na estação T1 às 15h:03min, sendo realizada durante a maré vazante de quadratura (FIGURA 9). A diferença média da altura da maré entre os dois levantamentos foi 0.56m. Durante a manhã o vento era NW com intensidade de 2m/s, passando a NE com intensidade de 4.2 m/s no início da tarde. A pluviosidade total nos sete dias anteriores foi 7.6mm em Pontal do Sul e 24.4 mm em Antonina.

A figura 30 mostra a estrutura hidrográfica da primeira campanha de 11 de abril de 2007. Pode se perceber a entrada, com a maré enchente, de águas mais salinas pelo meio e fundo da coluna d'água, ocorrendo um aumento gradativo da salinidade em direção ao fundo entre as estações T4 e T7. A salinidade mínima, 32.45 g/kg, foi encontrada na superfície da estação T1 e a maior, 35.6 g/kg, na camada de fundo da estação T7. A coluna d'água nas estações T1 e T2 apresenta-se bem misturada, com diferenças de apenas 0.3 g/kg entre as salinidades máximas e mínimas na estação T1. As isolinhas de salinidade apresentam uma inclinação em direção à superfície na estação T5, resultando em uma salinidade superficial maior do que nas estações vizinhas. Na superfície da estação T3 foi encontrada uma água superficial com salinidade e densidade menores e temperaturas ligeiramente maiores do que as águas circundantes, provavelmente resquício de uma água estuarina aprisionada pelas frentes de densidade. Com exceção de pequenas manchas, a temperatura apresenta um decréscimo em direção ao oceano.

A segunda campanha realizada neste mesmo dia coincidiu com a maré mais baixa registrada nos três dias anteriores à amostragem (FIGURA 9). As salinidades variaram de 30 g/kg, na camada superficial da estação T1, a 35.6 g/kg, nas camadas de fundo da estação T8. As isolinhas de densidade apresentam uma maior inclinação em direção ao oceano, com acentuado gradiente horizontal entre as estações T3 e T6. Pode-se notar a presença de águas superficiais de baixa salinidade “flutuando”, sobre águas mais densas, entre as estações T1 e T4. As

temperaturas na camada de fundo decrescem em direção ao oceano. Na camada superficial ocorrem duas termoclinas suaves, formadas pelas águas estuarinas entre as estações T1 e T3, e pelas águas aquecidas, por insolação, na plataforma entre as estações T7 e T8 (FIGURA 31).

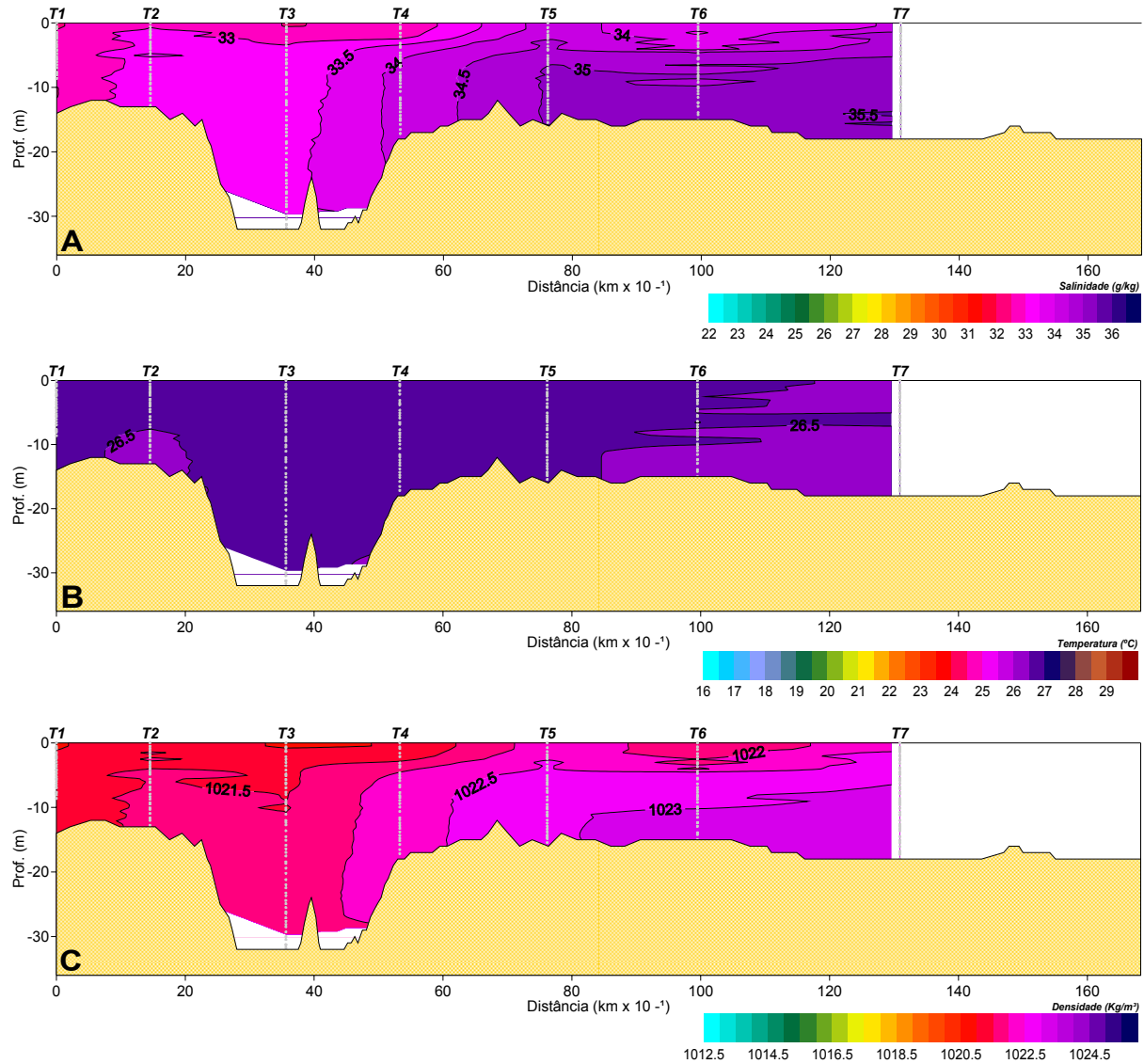


FIGURA 30 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À PRIMEIRA CAMPANHA DO DIA 11 DE ABRIL DE 2007

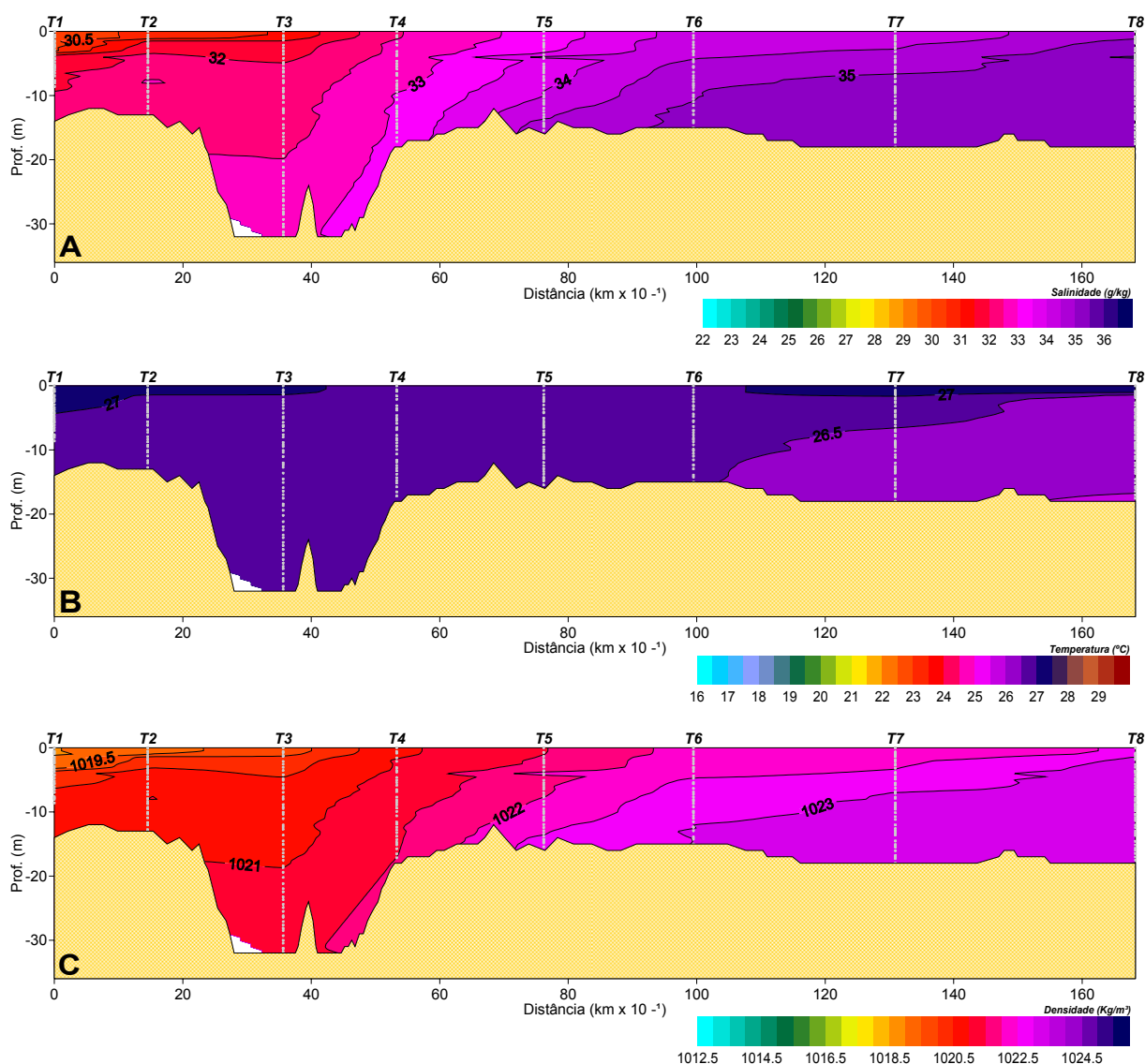


FIGURA 31 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À SEGUNDA CAMPANHA DO DIA 11 DE ABRIL DE 2007

A última campanha do período de verão, apesar de já se encontrar no outono, foi realizada no dia 12 de abril de 2007, e teve início na estação T1 às 10h:17min e final na estação na estação T8 às 11h:08min. Neste momento, a maré encontrava-se em final de enchente de quadratura (FIGURA 9) e os ventos tinham direção NE com intensidade de 1.4 m/s. A pluviosidade total registrada nos sete dias anteriores foi 26.4 mm em Pontal do Sul e 22.8 mm em Antonina.

A figura 32 mostra a estrutura hidrográfica do transecto amostral. A salinidade mínima encontrada foi 31.5 g/kg na camada superficial do ponto T2 e a máxima foi 36.3 g/kg no fundo da estação T7. Pode-se notar uma estratificação vertical bem definida entre as camadas T5 e T8. Entre as estações T7 e T8 esta estratificação é

bem homogênea horizontalmente, com exceção da camada de fundo, que separada do restante da coluna d'água por uma termoclina bem definida, tem um decréscimo bem acentuado das temperaturas em direção ao oceano. Na estação T5, as isolinhas de salinidade, temperatura e densidade estão mais próximas à superfície, mostrando uma tendência à ressurgência das águas do fundo da plataforma nesta região. Entre as estações T4 e T1 as isolinhas de salinidade e densidade são quase horizontais na superfície e tendem a verticalidade em direção ao fundo, resultado da intrusão halina pelas camadas subsuperfície.

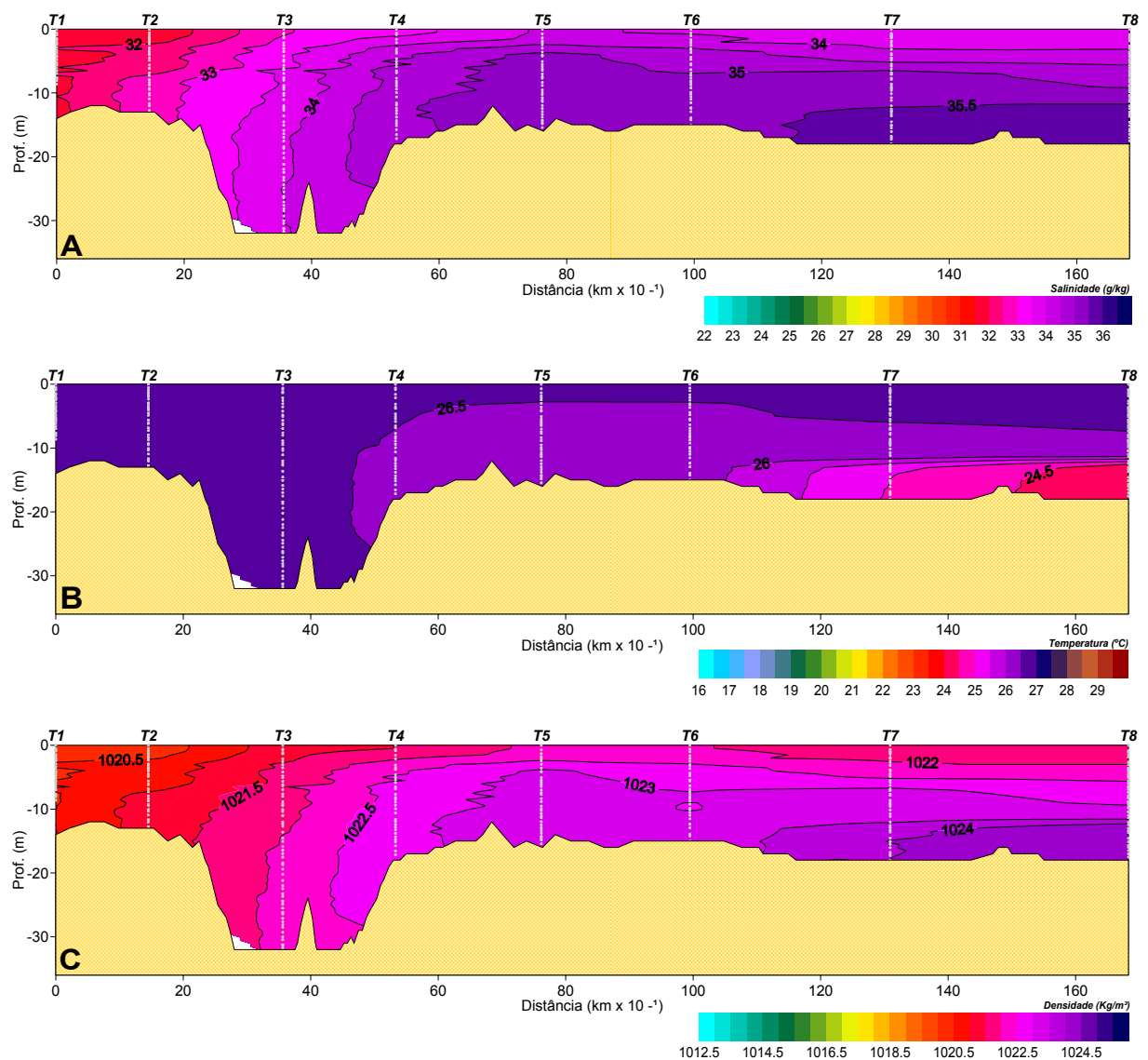


FIGURA 32 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 12 DE ABRIL DE 2007

5.2.1.2 Campanhas de inverno

Foram realizadas 10 campanhas amostrais durante os meses de agosto e setembro de 2007. A figura 33 mostra o horário dos levantamentos plotados sobre os dados de elevação do nível do mar registrados pela estação maregráfica da Ilha do Mel.

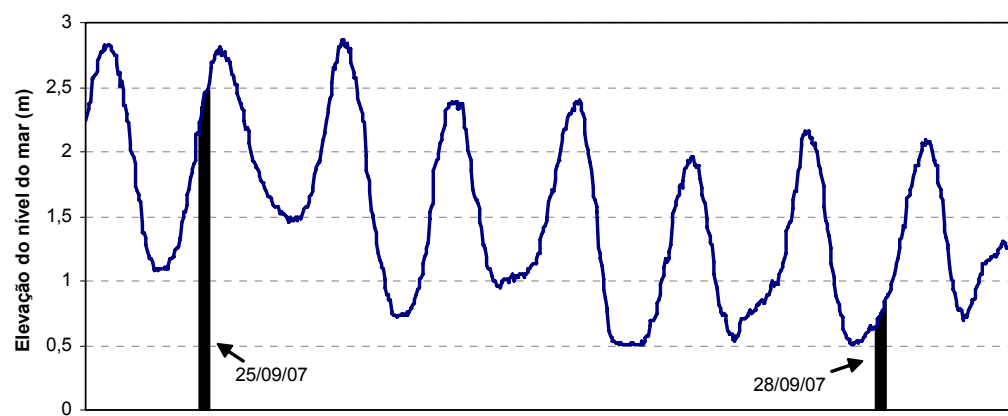
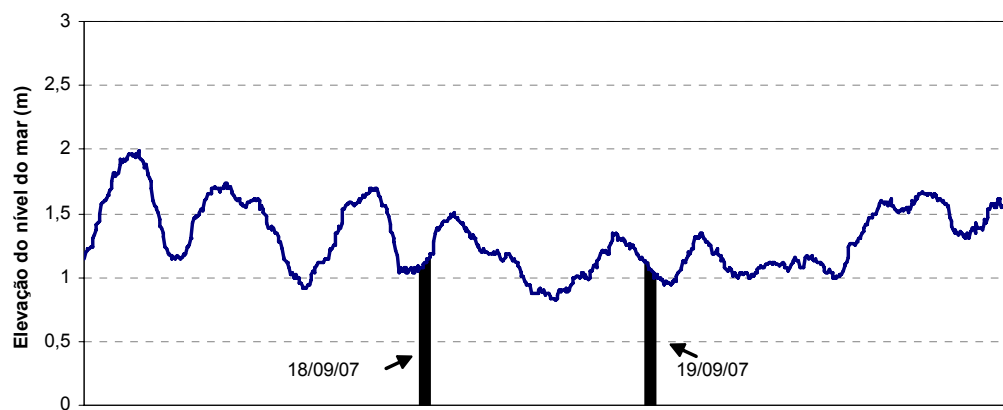
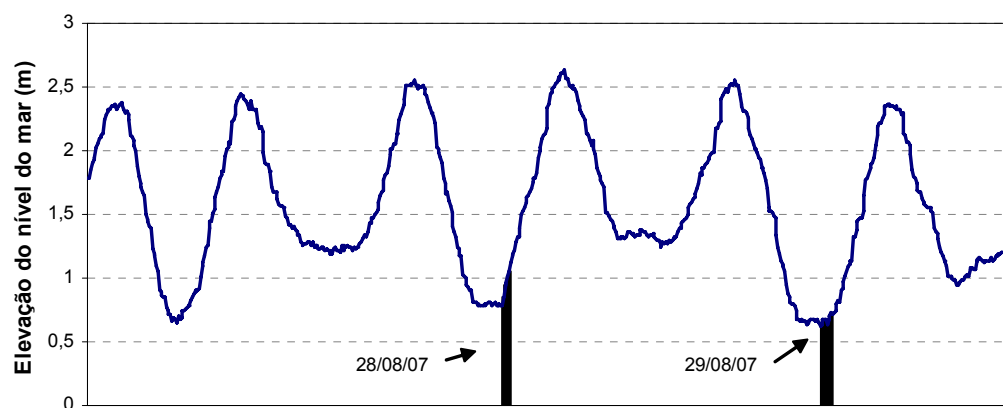
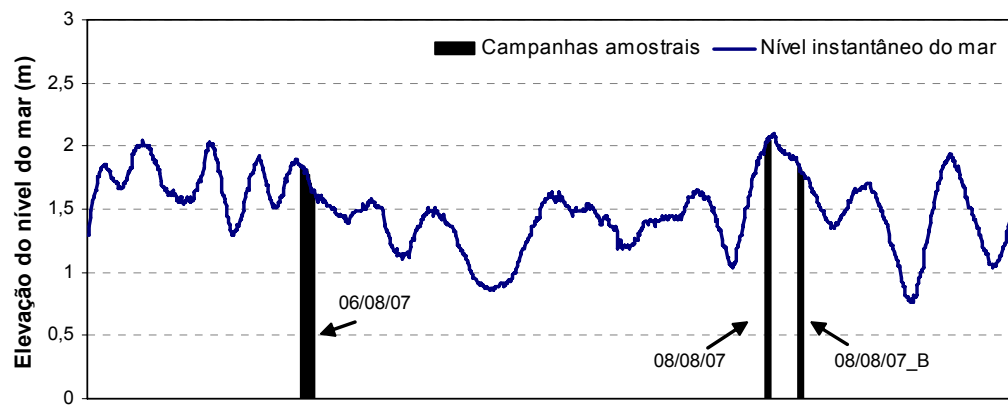


FIGURA 33 – REGISTRO MAREGRÁFICO REFERENTE AO PERÍODO DAS AMOSTRAGENS DE INVERNO

FONTE: PARANAGUÁ PILOTS (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

A figura 34 mostra os dados de precipitação registrados pela estação meteorológica do SIMEPAR em Antonina e do Centro de Estudos do Mar em Pontal do Sul para o período em que foram realizadas as campanhas amostrais de inverno.

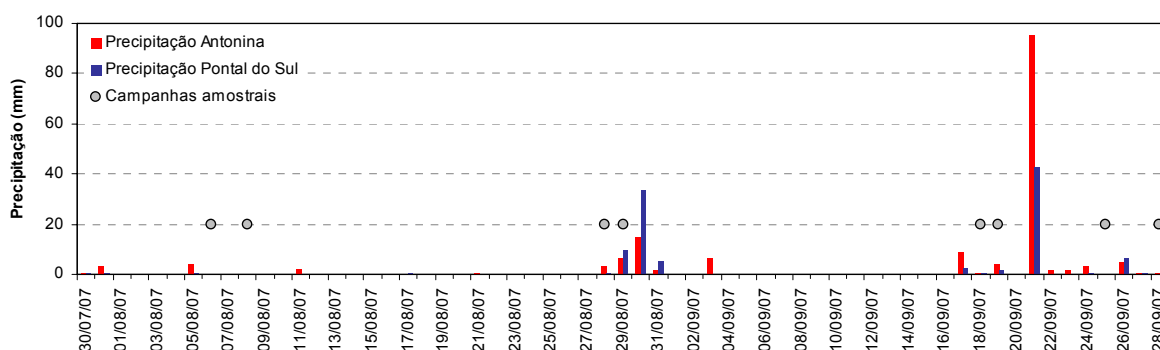


FIGURA 34 – PRECIPITAÇÃO ACUMULADA DIÁRIA, REFERENTE AO PERÍODO DAS CAMPANHAS AMOSTRAIS DE INVERNO

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA (2007) E SIMEPAR (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

A primeira campanha do inverno foi realizada no dia 06 de agosto de 2007, teve início na estação T08 às 10:30h e final na estação T01 às 12:00h. No momento da amostragem a altura da maré era de 1.8m. e encontrava-se em uma vazante de quadratura (FIGURA 33). No momento da amostragem o vento tinha sentido SW com 1.5m/s de velocidade. Porém nos dois dias anteriores à amostragem a direção dos ventos com velocidades maiores que 3m/s variou entre SW e SE, com média de 180°. A pluviosidade nos sete dias anteriores foi de 1.6mm em Pontal do Sul e de 8.2 mm em Antonina. A salinidade mínima, 27.69 g/kg foi encontrada na superfície da estação T3 e a máxima, 29.32 g/kg na estação T8 à 4m de profundidade.

Durante este levantamento, a coluna d'água encontrava-se bem misturada com estratificação média de 0.3 g/kg nas estações. A salinidade variou apenas 1.63 g/kg ao longo de todo o transecto. Apesar de não haver registros de chuvas significativas nos dias anteriores as salinidades ficaram abaixo de 30 g/kg. As temperaturas apresentaram um leve gradiente horizontal, com variação de 0.5°C entre as estações T4 e T8 (FIGURA 35).

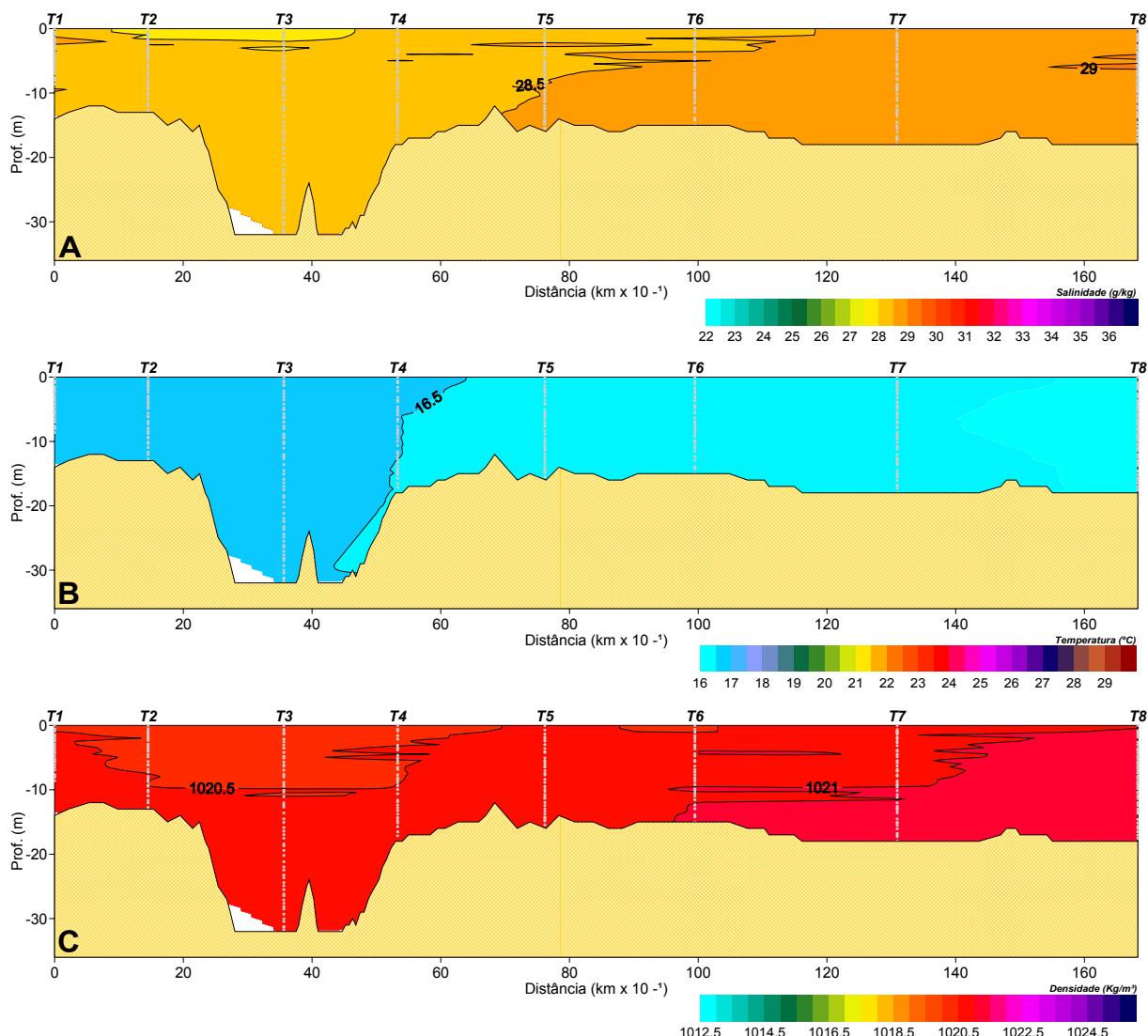


FIGURA 35 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 06 DE AGOSTO DE 2007

No dia 8/08/2007, por motivos técnicos, a campanha foi dividida em duas partes. A primeira (FIGURA 36) teve início às 11:28h na estação T8 e fim na estação T5 às 11:50h. A maré encontrava-se em enchente de quadratura (FIGURA 33) com altura média de 2.03m durante o levantamento o vento tinha direção sul com intensidade de 3m/s. As salinidades variaram entre 27.78 g/kg na camada de fundo da estação T5 e 28.17 g/kg na camada de fundo da estação T8, com diferença entre máxima e mínima de apenas 0.39 g/kg. A coluna d'água apresentou-se verticalmente homogênea em todas as estações com pequeno gradiente horizontal de salinidade entre as estações T7 e T8. A segunda parte do levantamento (FIGURA 37) teve início na estação T1 às 15:05h e fim na estação T6 às 15:47h. A maré

encontrava-se em uma vazante de quadratura (FIGURA 33) com altura média de 1.8m durante a campanha. Durante a amostragem o vento tinha direção sudeste com intensidade 3.5m/s. A salinidade máxima, 27.84 g/kg, foi encontrada na camada de fundo da estação T6 e a salinidade mínima, 25.73 g/kg, na camada superficial da estação T1. A salinidade e a temperatura apresentaram-se verticalmente homogêneas em todas as estações, com salinidades um pouco mais baixas apenas na superfície da estação T1. O gradiente horizontal de temperatura foi determinante para que a isolinha de densidade 1020 kg/m³ apresentasse uma inclinação entre as estações T2 e T4. Durante os sete dias anteriores a estes dois levantamentos a pluviosidade acumulada foi de 0.8mm em Pontal do Sul e de 4.6 mm em Antonina.

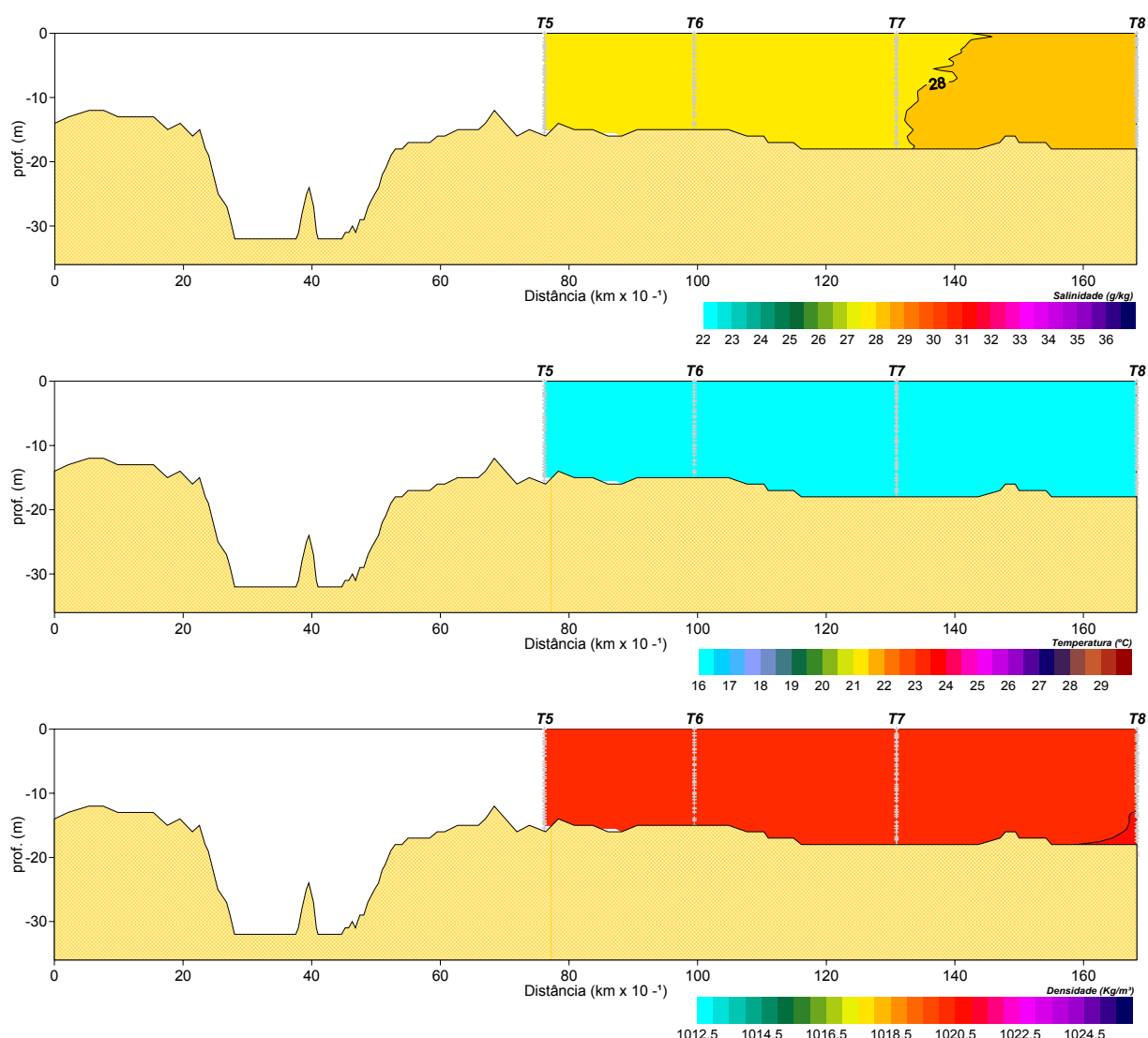


FIGURA 36 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À PRIMEIRA CAMPANHA DO DIA 08 DE AGOSTO DE 2007

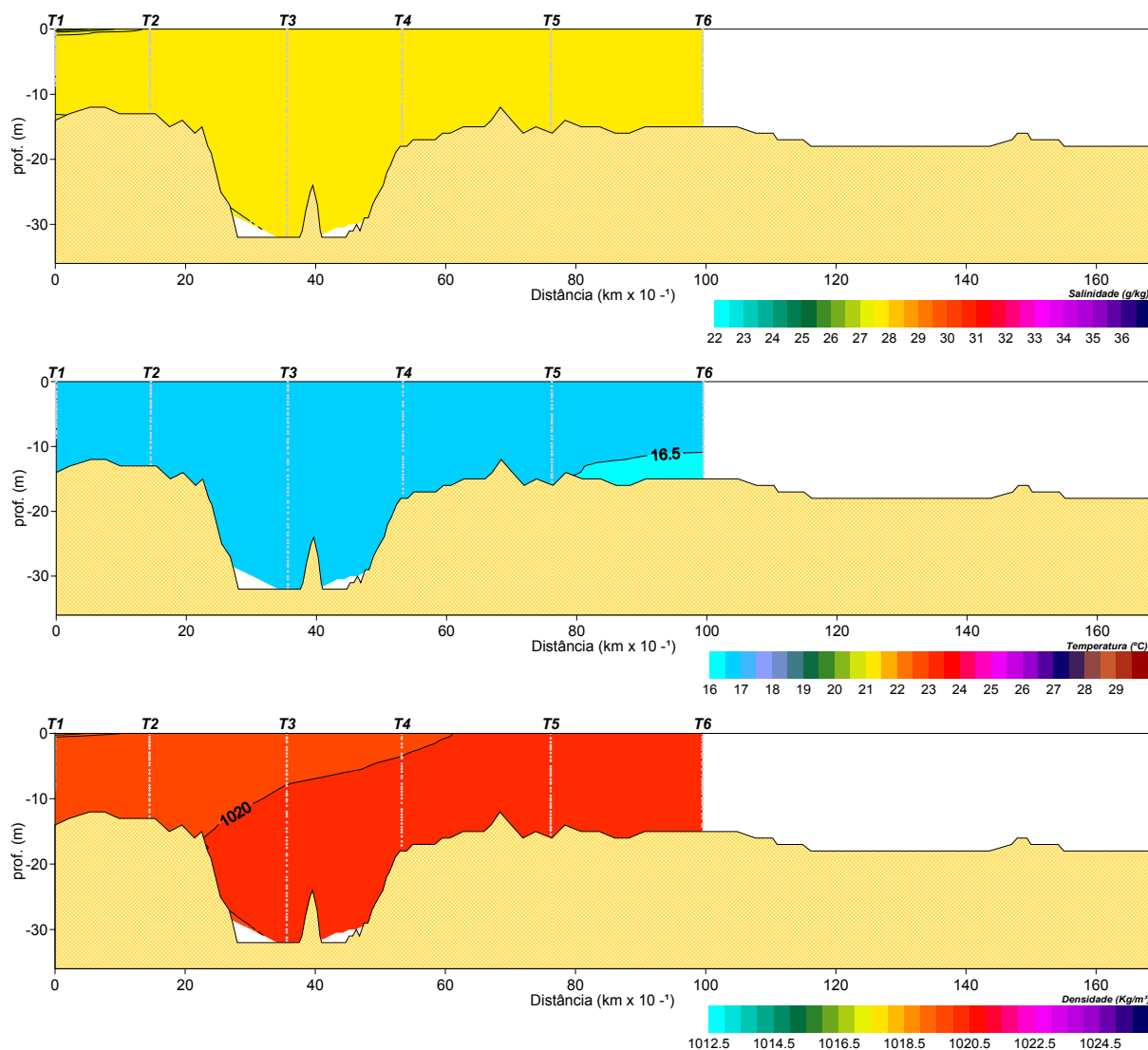


FIGURA 37 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À SEGUNDA CAMPANHA DO DIA 08 DE AGOSTO DE 2007

O levantamento do dia 28/08/07 teve início na estação T8 às 10:03h e fim na estação T1 às 10:56h. A maré encontrava-se na baixamar de sizígia com altura média de 0.96m durante o levantamento (FIGURA 33). A pluviosidade acumulada nos sete dias anteriores foi de apenas 0.4mm em Antonina não havendo registro de chuva para o período em Pontal do Sul. No momento da campanha o vento apresentava direção SW com intensidade de 4.9 m/s. A salinidade mínima encontrada foi de 28.18 g/kg. Na superfície da estação T1 e a máxima foi de 31.1 g/kg na camada de fundo da estação T8.

Através da análise da figura 38 é possível visualizar que a salinidade encontra-se praticamente homogênea entre as estações T1 e T4, apenas com um

aumento de 0.5 g/kg no fundo da estação T3. Entre as estações T4 e T5 verifica-se um gradiente horizontal de 0.5 g/kg. Na estação T6 aparece uma estratificação horizontal de 0.5 g/kg. Nas estações mais externas, T7 e T8, pode-se verificar existência de uma fina camada superficial menos salina e também a ocorrência de águas mais salinas na camada de fundo. Esta penetração de águas mais densas também é responsável pela formação de uma suave termoclina na camada de fundo destas duas estações. Os dados de temperatura também apresentam o maior gradiente horizontal entre as estações T4 e T5.

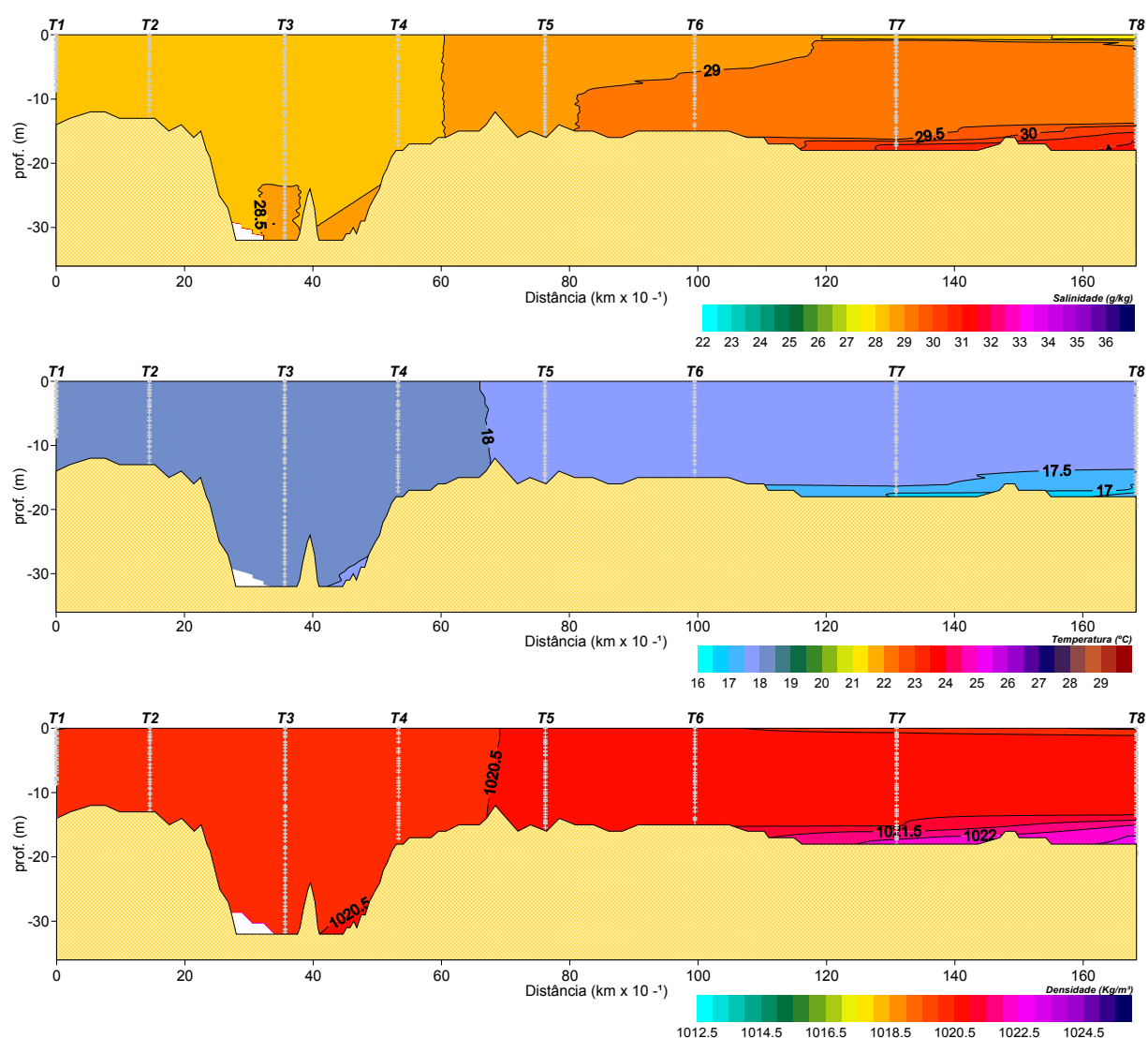


FIGURA 38 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 28 DE AGOSTO DE 2007

A campanha realizada no dia 29/08/07 teve início na estação T8 às 10:26h, sendo finalizada na estação T1 às 11:05h. Este levantamento foi realizado durante uma baixamar de sizígia (FIGURA 33) com altura da maré de 0.63m. Neste momento o vento tinha direção SW e intensidade de 3.4 m/s. A pluviosidade nos sete dias anteriores foi de 0.6mm em Pontal do Sul e 3 mm em Antonina. As salinidades variaram entre 27.86 g/kg, na superfície da estação T1, e 30.87 g/kg, na camada de fundo da estação T8.

Verticalmente as salinidades apresentaram-se praticamente homogêneas, com exceção da camada superficial da estação T1 e da camada de fundo das estações T7 e T8. As temperaturas apresentaram uma tendência de declínio em direção ao oceano, com as menores temperaturas sendo observadas no fundo da estação T8 (FIGURA 39).

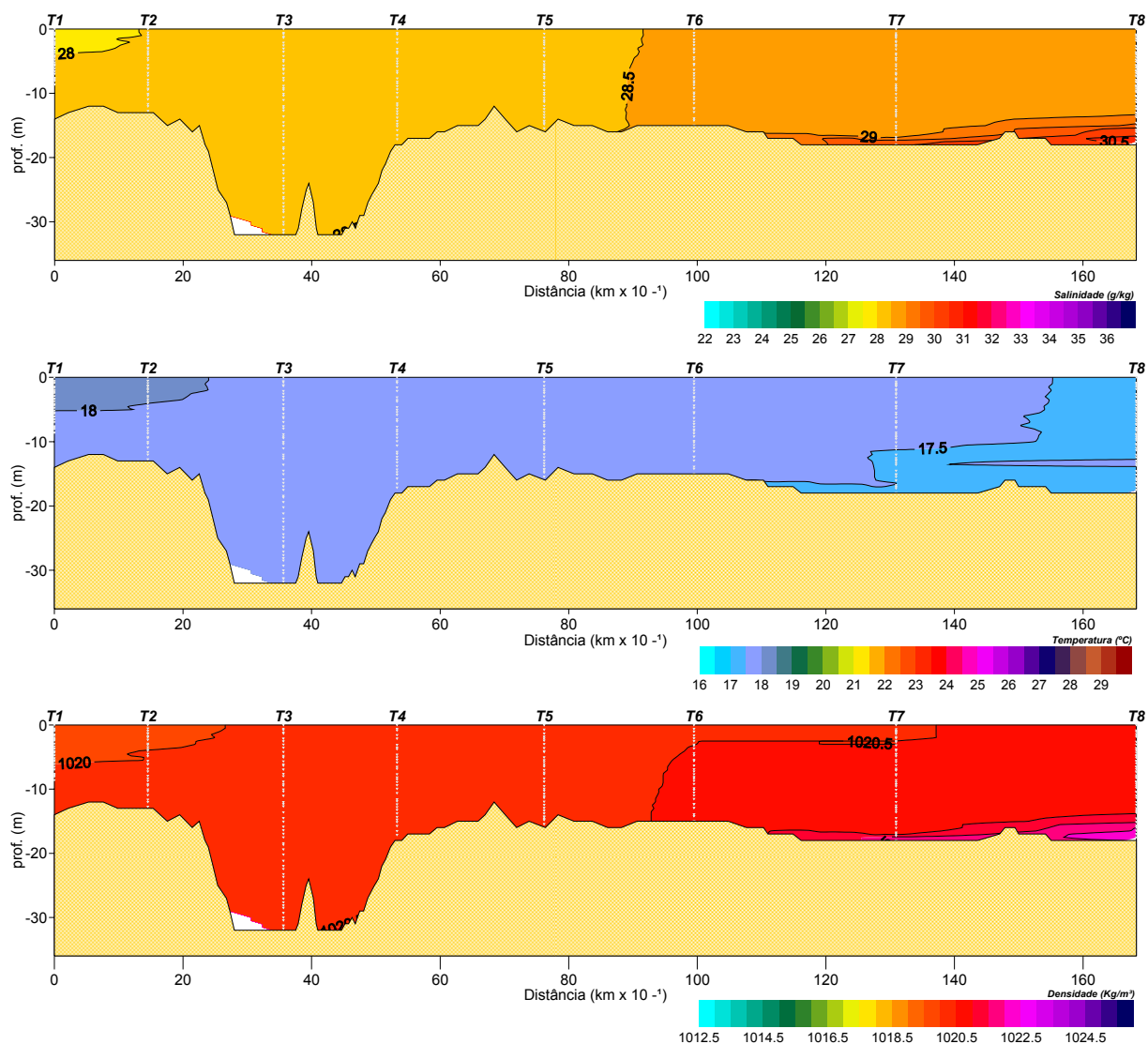


FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B) E DENSIDADE (C) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 29 DE AGOSTO DE 2007

A campanha de amostragem do dia 18/09/07 teve início na estação T8 às 11:28h e foi finalizada na estação T1 às 12:28h. Neste momento a maré encontrava-se na baixamar de quadratura (FIGURA 33) com altura de 1.12m. Nos sete dias anteriores a pluviosidade acumulada foi de 2.6 mm em Pontal do Sul e 9.2 mm em Antonina. O vento no momento da aquisição dos dados tinha direção NE com intensidade de 6.2 m/s. A salinidade mínima, 27.38 g/kg, foi encontrada na superfície da estação T1 e a máxima, 33.39 g/kg, na camada de fundo da estação T8.

A partir da estação T5 em direção ao mar, todas as estações apresentaram variação vertical de propriedades. Nestas estações a coluna d'água apresenta-se misturada da superfície até aproximadamente 10 metros de profundidade onde começam gradientes pronunciados de salinidade, temperatura e densidade, devido à presença de águas mais frias e salinas na camada de fundo. No limite de intrusão desta água de fundo, entre as estações T5 e T6, ocorrem os maiores gradientes horizontais de propriedades devido aos processos de mistura. Entre as estações T1 e T4 a coluna d'água apresenta fraca estratificação, com as isolinhas de salinidade e densidade levemente inclinadas. As temperaturas na camada superficial apresentam suave declínio em direção ao mar aberto com os maiores gradientes entre as estações T3 e T4 (FIGURA 40).

Nas amostragens realizadas a partir do dia 18/09/07 o equipamento utilizado passou a contar também com um sensor de turbidez (maiores detalhes na seção 4). Os maiores valores de turbidez foram encontrados na camada de fundo das estações T4 T5 e T6, e em praticamente toda a coluna d'água na estação T4. Isto se deve a estas estações estarem localizadas na seção do canal da Galheta, que passa sobre o delta arenoso da desembocadura. Nesta região, nas laterais do canal, as profundidades são bastante reduzidas, permitindo que as ondas ressuspendam os sedimentos de fundo, o que eleva a resposta do sensor de turbidez nestas estações. Este processo foi confirmado visualmente durante as amostragens de campo, sendo verificado que nos dias em que ondas estavam arrebatando sobre o

delta a água nas estações T4 e T4 apresentou uma coloração mais amarronzada (FIGURA 40).

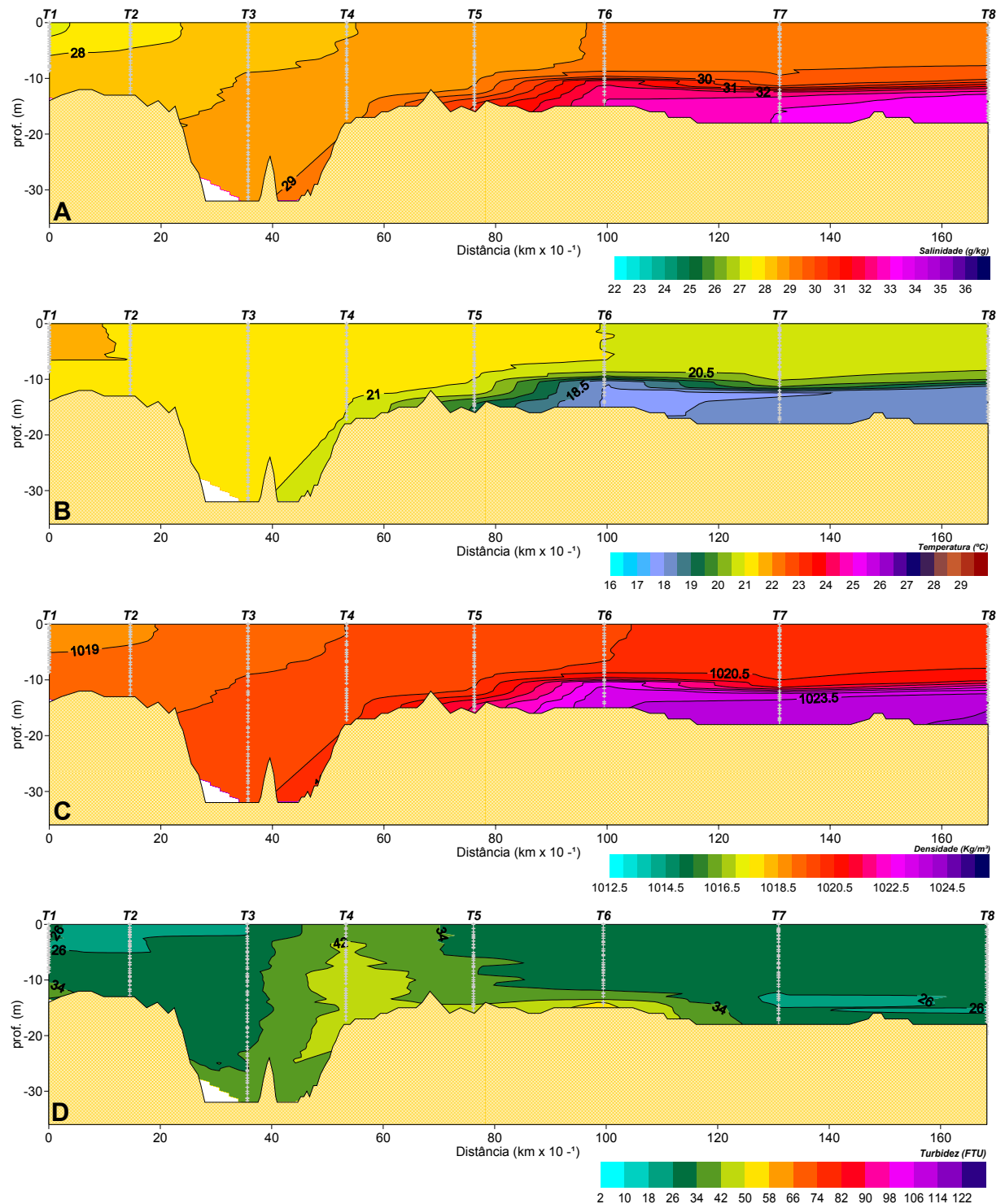


FIGURA 40 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B), DENSIDADE (C) E TURBIDEZ (D) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 18 DE SETEMBRO DE 2007

No dia 19/09/07 a campanha amostral teve início às 09:41h na estação T8 e fim às 10:40h na estação T1. A maré encontrava-se em vazante de quadratura (FIGURA 33) com altura de 1.06. A precipitação acumulada nos sete dias anteriores foi de 3.4mm em Pontal do Sul e de 9.8mm em Antonina. Durante o levantamento o vento tinha direção sul com intensidade de 3.4 m/s. A salinidade mínima encontrada foi 27.36 g/kg na superfície da estação T1 e a maior foi de 34.09 g/kg na camada de fundo da estação T8.

Durante este levantamento as isolinhas de temperatura, salinidade e densidade encontravam-se horizontais entre as estações T5 e T8, apresentando-se ligeiramente inclinadas entre as estações T1 e T4. Os maiores gradientes verticais de temperatura e salinidade entre as estações T5 e T8, foram encontrados ao redor dos cinco metros de profundidade. Os maiores valores de turbidez foram encontrados na camada de fundo da estação T6 e T4, com tendência de diminuição em direção ao oceano. A isohalina de 30g/kg, que encontra-se praticamente junto ao fundo na estação T1, sofre inclinação e é encontrada próxima à superfície na estação T5. Processo semelhante ocorre com a temperatura e com a densidade. Uma água menos densa sai do estuário por praticamente toda a coluna d'água até a estação T2. A partir da estação T3 essa água encontra uma frente de densidade gerada pela presença da cunha salina e é advectada em direção à superfície, passando a ocupar a camada superficial a partir da estação T5 formando uma pluma separada das camadas inferiores por consideráveis gradientes de salinidade, temperatura e densidade (FIGURA 41).

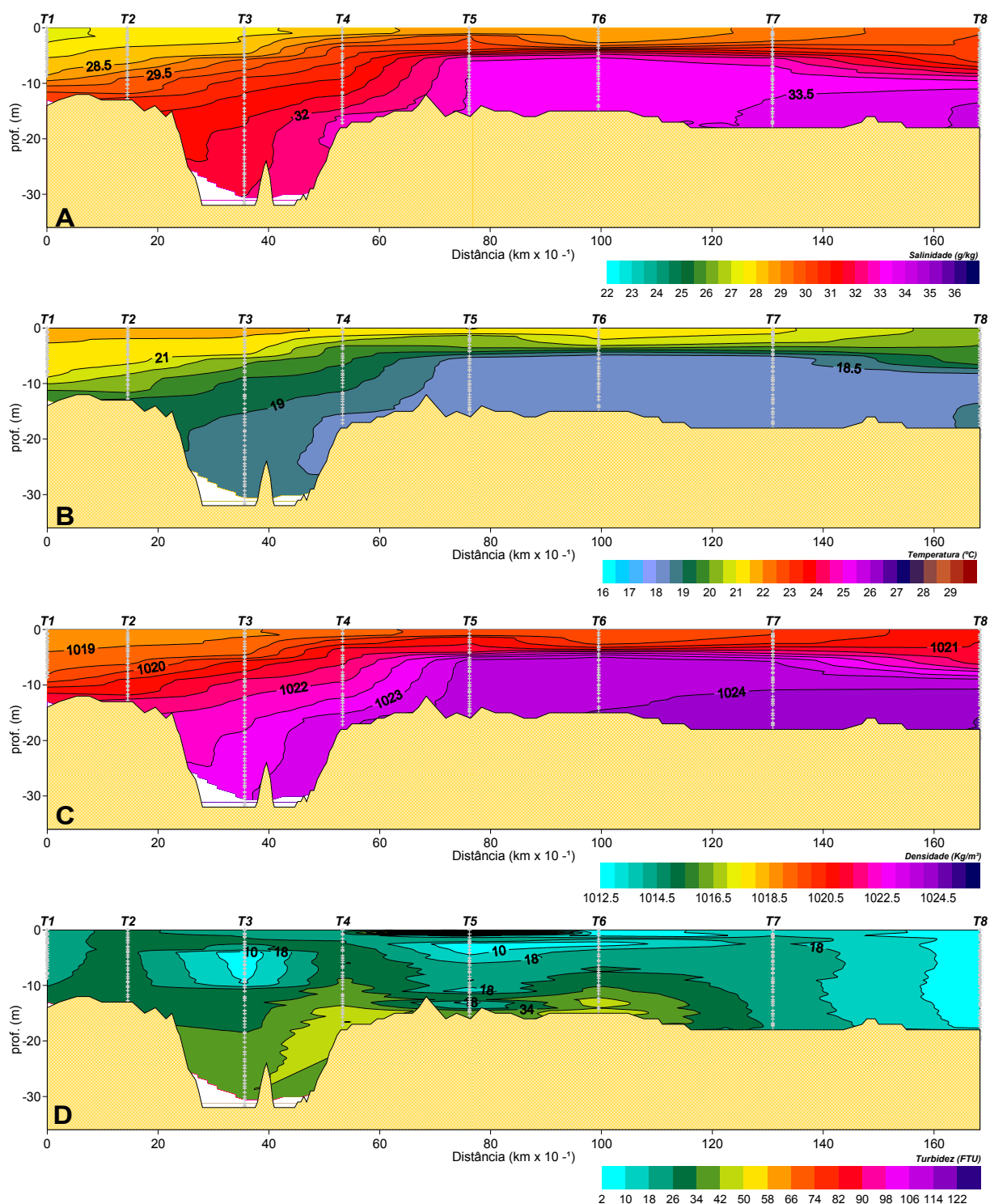


FIGURA 41 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B), DENSIDADE (C) E TURBIDEZ (D) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 19 DE SETEMBRO DE 2007

A campanha do dia 25/09/07 teve início às 11:35h na estação T8 e fim às 12:22h na estação T1. A maré encontrava-se na enchente de sizígia (FIGURA 33) com altura de 2.30m. A precipitação acumulada nos sete dias anteriores foi de 45.6

mm em Pontal do Sul e de 106.4 mm em Antonina. Durante a realização da campanha o vento apresentava direção sul com intensidade de 4.5 metros por segundo. A menor salinidade, 29.13 g/kg foi encontrada na superfície da estação T1, e a maior, 32.5 g/kg, foi encontrada na camada de fundo da estação T8.

Neste levantamento, a coluna d'água em todo o transecto apresentou pouca variação nas propriedades físicas. A coluna d'água esteve bem misturada em todas as estações com um pequeno gradiente vertical de temperatura, salinidade e densidade na camada de fundo entre as estações T6 e T8. Os maiores gradientes horizontais de propriedades são encontrados entre as estações T4 e T6. A turbidez apresenta os maiores valores na camada de fundo da estação T4. No restante da coluna verifica-se uma diminuição da turbidez em direção ao oceano (FIGURA 42).

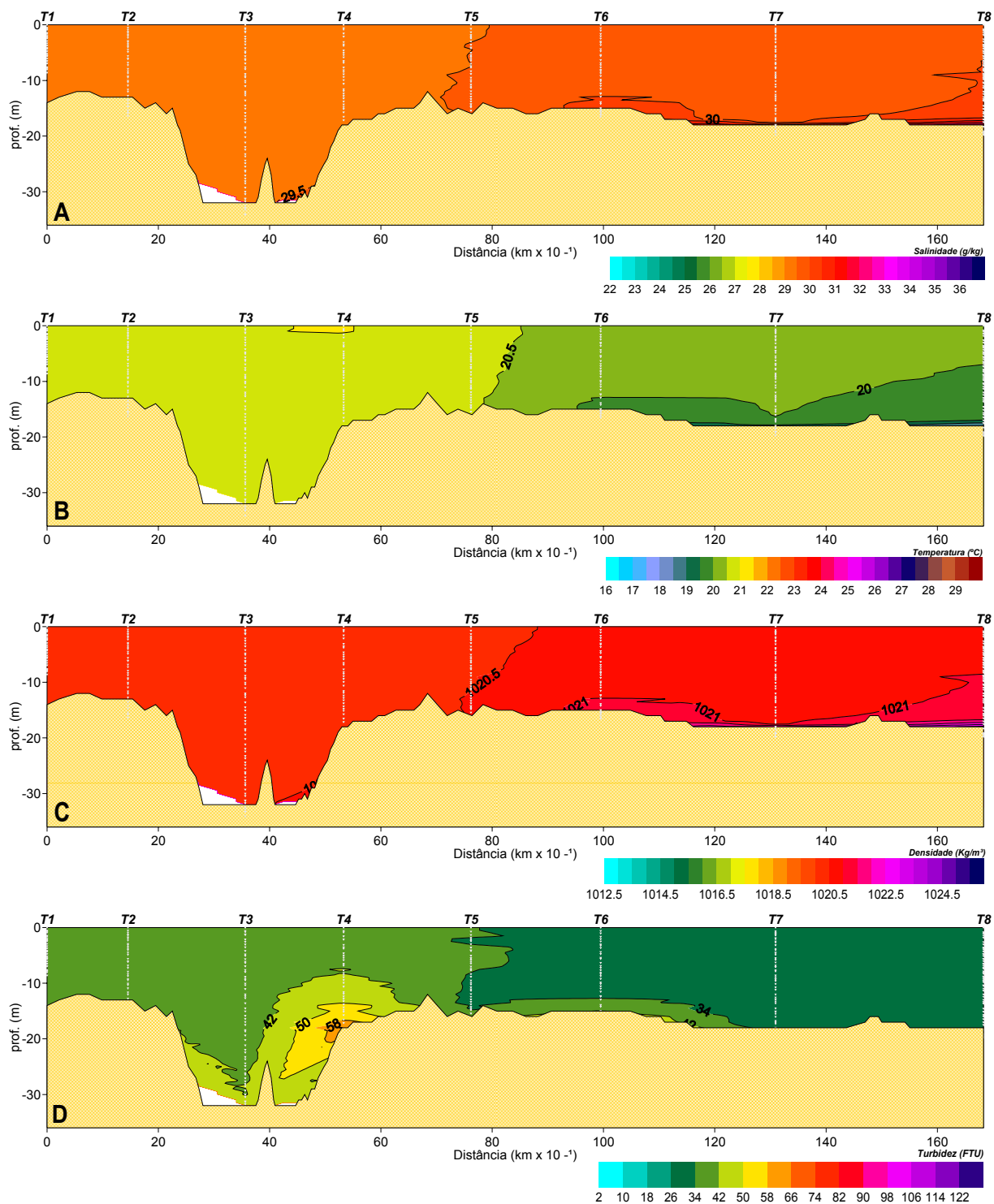


FIGURA 42 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B), DENSIDADE (C) E TURBIDEZ (D) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 25 DE SETEMBRO DE 2007

A campanha realizada no dia 28/09/07 teve início às 10:56h na estação T8, sendo finalizada às 11:48h na estação T1. A maré encontrava-se no início da enchente de sizígia (FIGURA 33) com altura 0.72m. No momento da amostragem os

ventos tinham direção sul com intensidade de 4.5 m/s. A precipitação acumulada nos sete dias anteriores foi de 50mm em Pontal do Sul e de 106.8mm em Antonina. A salinidade mínima, 28.17 g/kg, foi encontrada na superfície da estação T3 e a máxima, 32.56 g/kg, no fundo da estação T8.

Nesta campanha a coluna d'água encontra-se bem misturada nas estações T1, T2 e T5. Um gradiente vertical mais acentuado na salinidade temperatura e densidade é observado próximo ao fundo nas estações T7 e T8, porém acima desta haloclina a coluna d'água encontra-se bem misturada. O maior gradiente horizontal de salinidade é encontrado entre as estações T4 e T5. Valores elevados de turbidez são encontrados no fundo das estações T4, T5 e T6, sendo que na estação T4 quase toda a coluna d'água apresenta valores elevados. Isso ocorre devido à ressuspensão de sedimentos pela quebra de ondas sobre o delta da desembocadura do estuário (FIGURA 43).

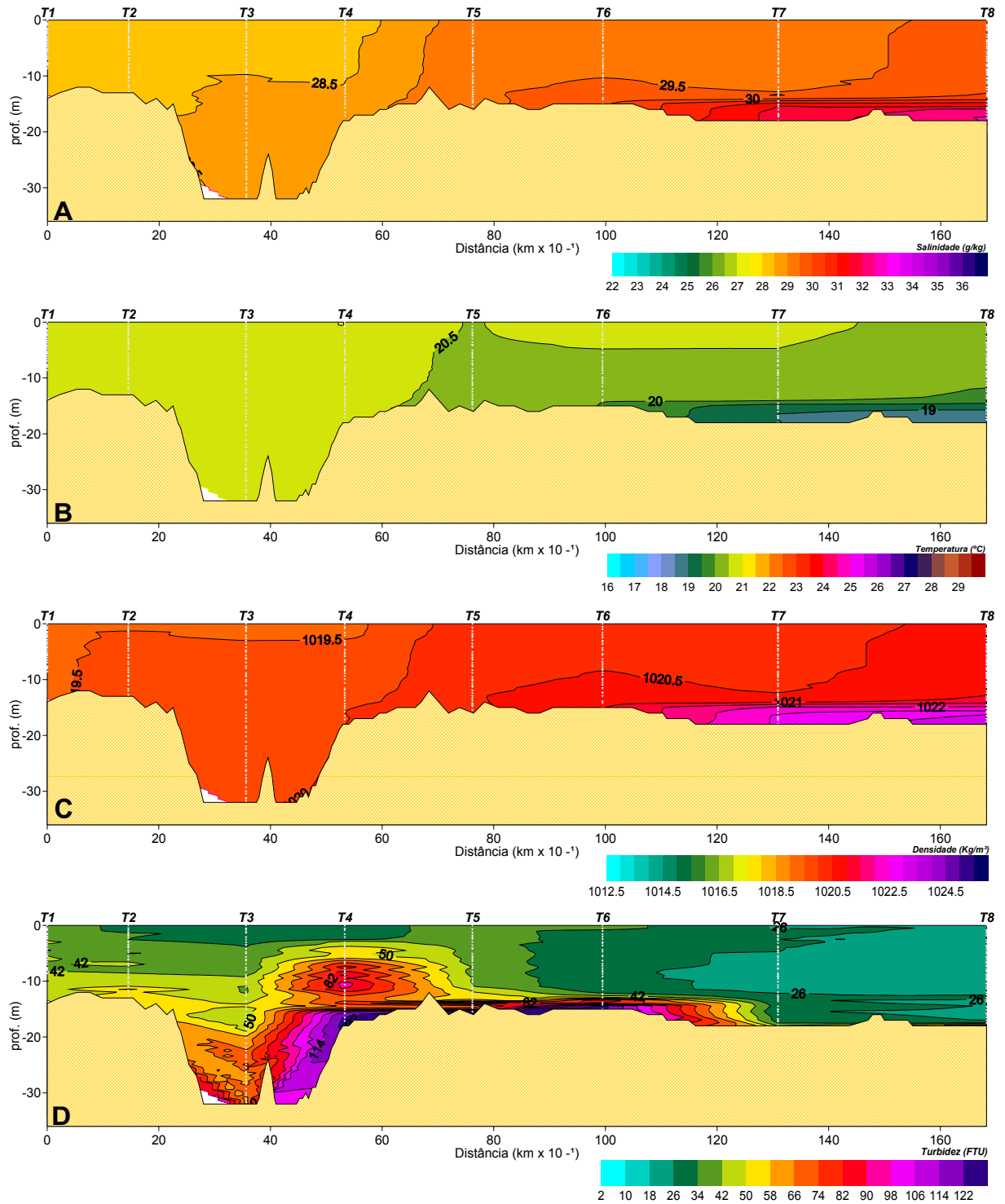


FIGURA 43 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DA SALINIDADE (A), TEMPERATURA (B), DENSIDADE (C) E TURBIDEZ (D) AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL, REFERENTE À CAMPANHA DO DIA 28 DE SETEMBRO DE 2007

5.2.1.3 Variabilidade dos parâmetros físicos

Nas campanhas de verão, realizadas entre 15 de fevereiro de 2007 e 12 de abril de 2007, a temperatura da água nas estações amostradas apresentou valores que variaram entre 21.64°C e 29.39°C, a salinidade entre 22.1 g/kg e 36.5 g/kg e a densidade entre 1012.8 kg/m³ e 1025.43 kg/m³. Durante as campanhas de inverno, realizadas entre 06 de agosto de 2007 e 29 de setembro de 2007, a temperatura variou entre 15.90°C e 21.79°C, a salinidade entre 25.73 g/kg e 34.09 g/kg e a densidade entre 1018.48 kg/m³ e 1024.53 kg/m³. Durante as quatro últimas campanhas de inverno, também foram obtidos dados referentes à turbidez da água, que variou entre 2.31 ftu e 126.12 ftu. As Tabelas 1 e 2 apresentam uma descrição geral de todos os dados obtidos nas campanhas de verão e inverno.

TABELA 1 - RESUMO DOS DADOS OBTIDOS DURANTE AS CAMPANHAS DE VERÃO

TEMPERATURA										
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
média	27.92	27.84	27.71	27.57	27.28	27.05	26.68	26.43	26.72	26.61
desvpad	0.78	0.81	0.79	0.85	1.02	1.03	1.24	1.56	1.22	0.88
max	29.392	29.188	28.837	29.255	28.986	29.163	29.093	29.075	28.385	28.098
min	26.524	26.472	26.356	25.562	24.369	23.621	22.791	21.643	23.591	24.863
variação	2.868	2.716	2.481	3.693	4.617	5.542	6.302	7.432	4.794	3.235
SALINIDADE										
média	32.20	32.41	33.04	33.41	33.99	34.75	34.91	35.20	35.18	35.22
desvpad	1.97	1.94	1.65	1.58	1.77	0.93	0.99	0.85	0.86	0.86
max	34.93	34.948	35.27	35.79	36.26	36.29	36.394	36.502	36.116	36.275
min	22.159	24.664	25.869	27.045	27.574	30.654	32.05	32.419	32.678	32.993
variação	12.771	10.284	9.401	8.745	8.686	5.636	4.344	4.083	3.438	3.282
DENSIDADE										
média	1020.35	1020.55	1021.09	1021.38	1021.90	1022.55	1022.79	1023.09	1022.99	1023.06
desvpad	1.53	1.55	1.34	1.35	1.57	0.94	1.07	1.05	0.95	0.87
max	1022.43	1022.59	1023.09	1023.7	1024.48	1024.79	1024.98	1025.43	1024.69	1024.17
min	1012.8	1014.51	1016.06	1016.75	1016.65	1018.98	1020.22	1020.63	1020.94	1021.16
variação	9.63	8.08	7.03	6.95	7.83	5.81	4.76	4.8	3.75	3.01

TABELA 2 - RESUMO DOS DADOS OBTIDOS DURANTE AS CAMPANHAS DE INVERNO

TEMPERATURA								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
média	19.37	19.17	19.01	18.93	18.56	18.26	18.26	18.09
desvpad	1.84	1.81	1.77	1.74	1.68	1.62	1.54	1.48
max	21.791	21.736	21.617	21.456	21.065	21.279	21.096	20.9
min	16.596	16.589	16.562	16.495	16.19	16.104	16.031	15.903
variação	5.195	5.147	5.055	4.961	4.875	5.175	5.065	4.997
SALINIDADE								
média	28.32	28.50	28.74	28.83	29.34	29.41	29.77	30.07
desvpad	0.65	0.69	0.96	1.06	1.46	1.47	1.48	1.64
max	30.438	31.035	32.062	32.666	33.078	33.366	33.883	34.097
min	25.7301	27.584	27.6365	27.6658	27.7087	27.7802	27.9563	27.828
variação	4.7079	3.451	4.4255	5.0002	5.3693	5.5858	5.9267	6.269
DENSIDADE								
média	1019.85	1020.05	1020.30	1020.36	1020.83	1020.96	1021.24	1021.51
desvpad	0.62	0.59	0.77	0.79	1.09	1.10	1.13	1.20
max	1021.462	1022.012	1023.006	1023.471	1023.81	1024.038	1024.429	1024.532
min	1018.488	1018.675	1018.871	1019.178	1019.784	1019.577	1020.002	1019.9
variação	2.9738	3.337	4.135	4.293	4.026	4.461	4.427	4.632
TURBIDEZ								
média	33.59	35.99	38.08	49.24	31.77	34.71	26.54	22.05
desvpad	7.54	7.89	14.03	19.93	17.33	15.11	4.26	11.08
max	48.361	59.7	99.125	126.123	124.903	125.113	50.554	61.407
min	23.546	24.967	4.416	23.909	2.317	2.88	3.004	5.102
variação	24.815	34.733	94.709	102.214	122.586	122.233	47.55	56.305

A temperatura média durante as campanhas de verão apresentou diminuição em direção ao oceano, com o menor valor na estação T8. Nas estações T9 e T10 ocorre um ligeiro aumento na temperatura média. O desvio padrão apresenta comportamento inverso, aumentando em direção ao oceano, com maior valor de desvio na estação T8 e ligeira queda nas estações T9 e T10. As maiores temperaturas nas estações internas se devem provavelmente ao aquecimento das águas confinadas do estuário, e as temperaturas médias mais baixas nas estações situadas na plataforma à penetração de águas frias nas camadas de fundo em determinadas situações, o que resulta também em aumento do desvio padrão para a estação T8. Muito provavelmente as estações T9 e T10 não acompanharam a tendência de média e desvio padrão da estação T8 porque foram amostradas em apenas duas campanhas de campo (FIGURA 44).

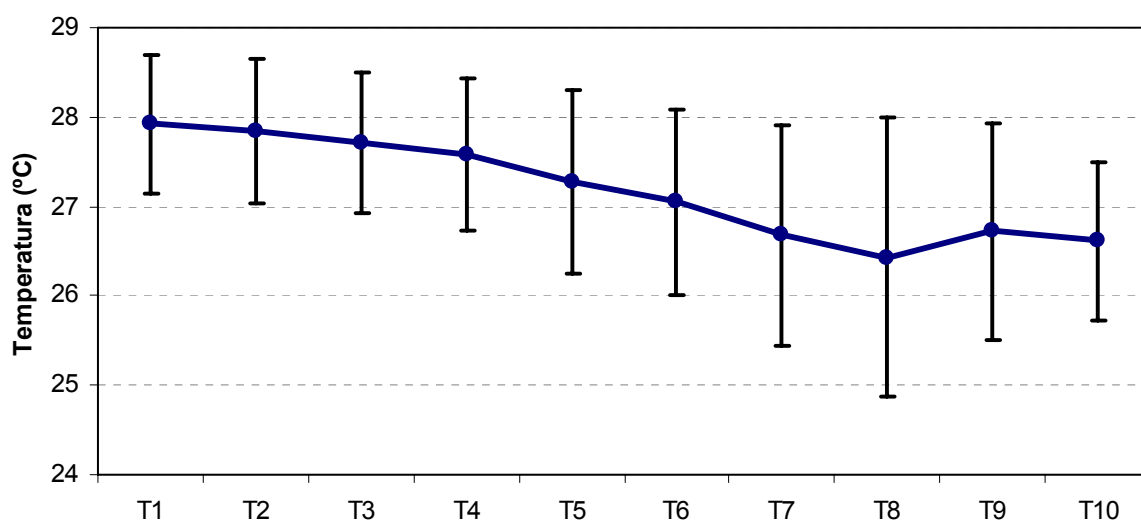


FIGURA 44 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE VERÃO

As médias e desvios da salinidade e densidade tiveram comportamentos muito parecidos. Os menores valores médios foram encontrados entre as estações T1 e T5 e refletem a influência direta da descarga estuarina. Os maiores valores de desvio padrão destas estações refletem a grande variabilidade que ocorre devido a influência da descarga de água doce e da intrusão salina. Nas estações mais distantes da costa a média é maior e o desvio menor, tanto para a salinidade quanto para a densidade, resultado de uma menor influência estuarina e maior estabilidade da coluna d'água (FIGURAS 45 E 46).

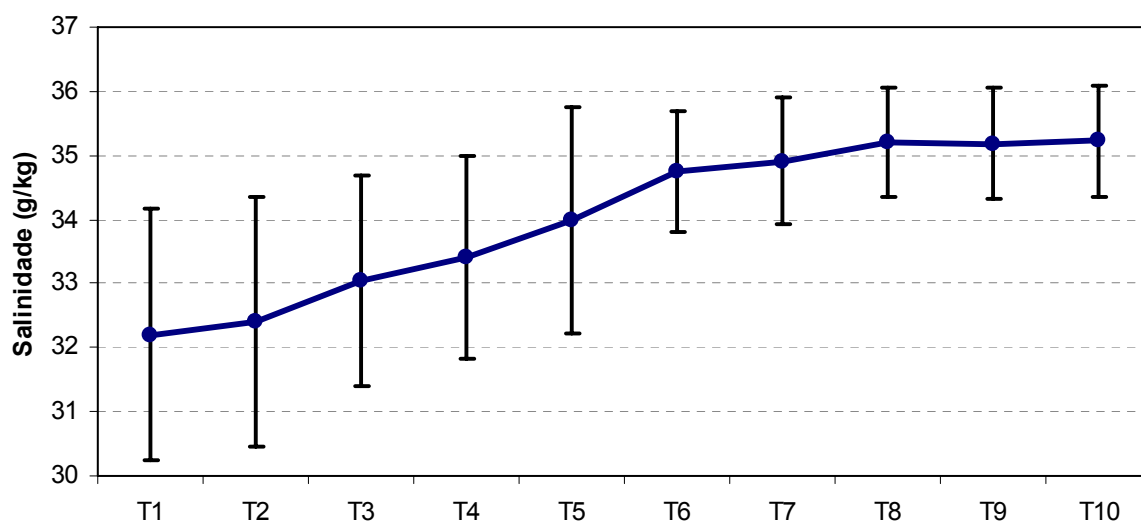


FIGURA 45 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA SALINIDADE MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE VERÃO

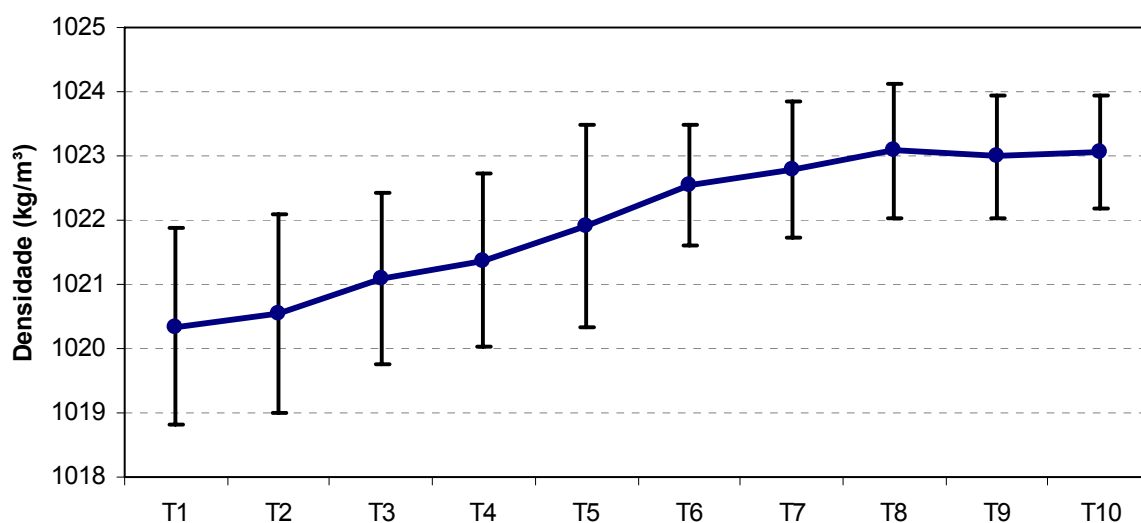


FIGURA 46 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA DENSIDADE MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE VERÃO

Durante as campanhas de inverno as temperaturas médias apresentaram declínio em direção ao oceano. Isto pode ser resultado da presença de águas mais frias sobre a plataforma, como será mais bem abordado adiante. O desvio padrão foi muito parecido entre as estações, talvez devido à menor estratificação da coluna d'água nesta época do ano (FIGURA 47).

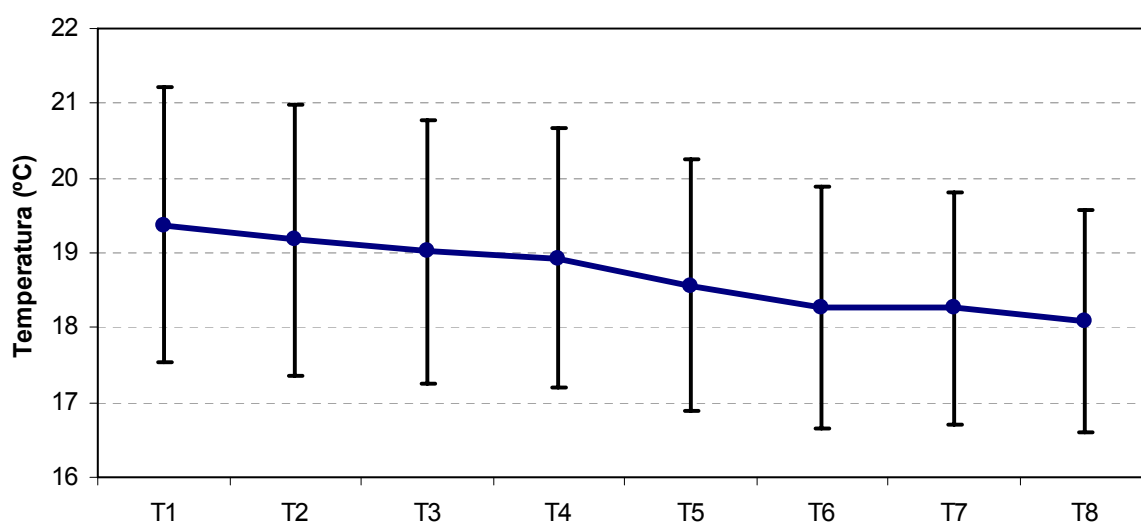


FIGURA 47 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA TEMPERATURA MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE INVERNO

A salinidade e densidade média durante o inverno também tiveram comportamento muito parecido, com aumento em direção ao oceano. Porém o

desvio padrão nas estações mais internas foi pequeno se comparado ao verão, resultado da baixa vazão de água doce nesta época do ano (FIGURAS 48 E 49).

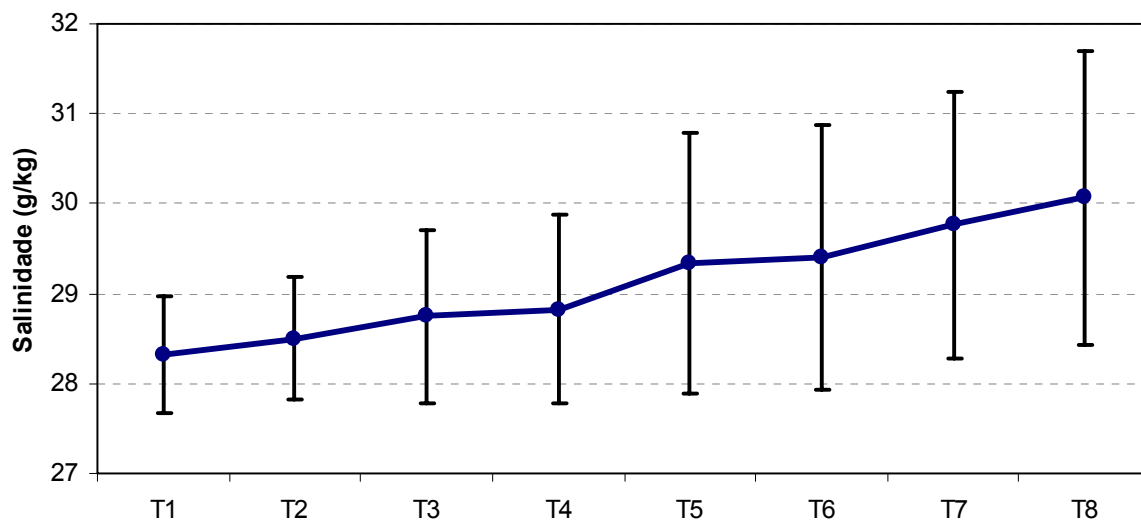


FIGURA 48 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA SALINIDADE MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE INVERNO

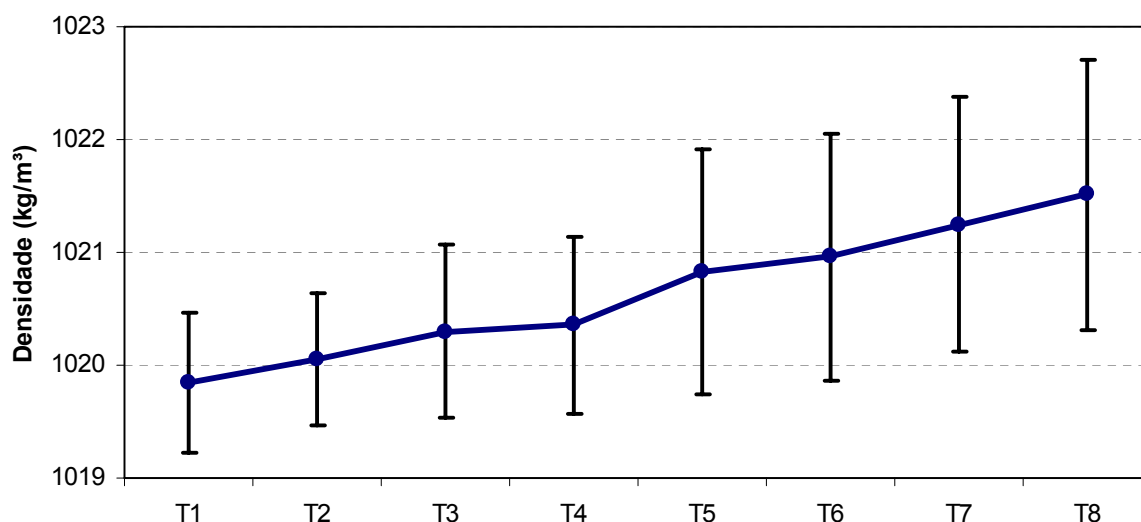


FIGURA 49 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA DENSIDADE MÉDIA E DESVIO PADRÃO POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE INVERNO

A turbidez foi o parâmetro que apresentou maior diferença entre as estações, tanto nas médias quanto nos desvios (FIGURA 50). Os maiores valores médios foram encontrados na estação T4. Isto se deve a esta estação estar localizada próxima ao delta arenoso da desembocadura, estando sujeita a arrebentação de ondas nas proximidades, aumentando consideravelmente a turbidez durante dias de

mar agitado. As estações T3, T5 e T6 também sofrem a influência da ressuspensão de sedimentos no delta, porém de maneira menos intensa.

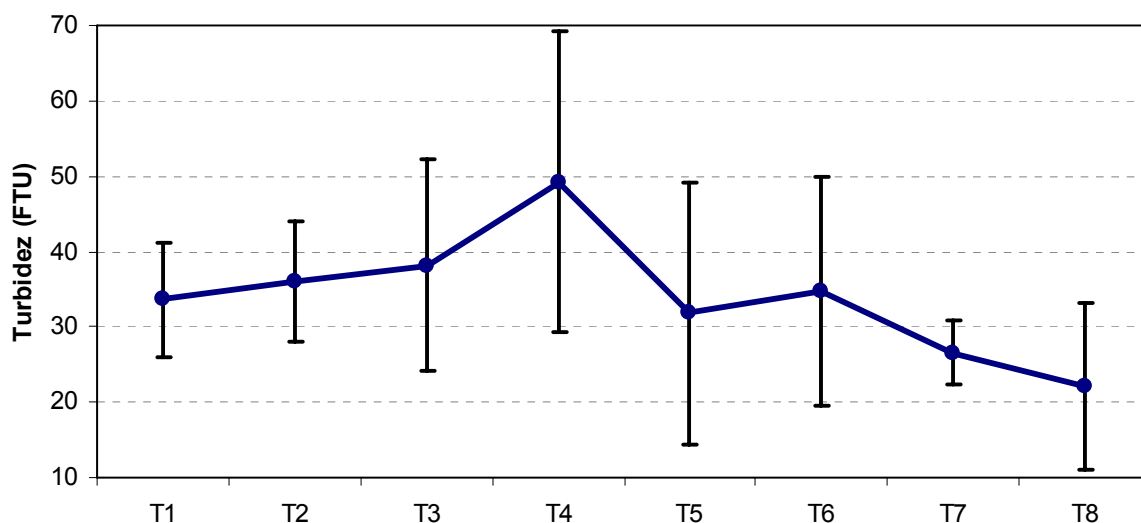


FIGURA 50 – VARIAÇÃO TEMPORAL DA TURBIDEZ POR ESTAÇÃO AMOSTRAL DURANTE TODAS AS CAMPANHAS DE INVERNO

A estratificação salina (S_f - S_s) média, onde S_f é a salinidade da camada de fundo e S_s a salinidade da camada superficial, foi maior durante as campanhas de verão, tanto em marés de sizígia, quanto em quadratura. Nas sizígias a estratificação foi menor do que nas quadraturas nas campanhas de verão e inverno. A salinidade média do transecto (S média) e o gradiente horizontal de salinidade na superfície (dS/dX), definido como sendo a variação da salinidade por quilômetro, também foram maiores durante o verão. A porcentagem média de água doce no transecto foi maior no inverno do que no verão em ambas as situações de maré (TABELA 3).

TABELA 3 – COMPARAÇÃO DE INDICADORES DINÂMICOS ENTRE MARÉS DE QUADRATURA E SIZÍGIA E DURANTE AS CAMPANHAS DE VERÃO E INVERNO (VALORES MÉDIOS)

	VERÃO		INVERNO	
	SIZÍGIA	QUADRATURA	SIZÍGIA	QUADRATURA
S_f - S_s média	1.55	2.06	0.73	1.51
% água doce média	6.52	5.82	8.62	5.95
S média	33.63	33.94	29.01	29.04
dS/dX	0.17	0.25	0.05	0.12

A estratificação salina média foi maior no verão devido a dois fatores: o maior aporte de água doce, causando a formação de plumas superficiais bem destacadas e a intrusão de águas mais salinas pelas camadas de fundo das estações mais distantes da costa. Os maiores gradientes superficiais de salinidade durante o verão também se devem a vazão elevada de água doce e a mistura da pluma com as águas da plataforma. A estratificação é menor durante as sizígias devido à mistura pelas correntes de maré. Apesar da precipitação no inverno ter sido bem menor do que no verão as salinidades são menores, havendo maior quantidade de água doce misturada. Isto se deve à presença de águas de baixa salinidade na plataforma que são oriundas de outras regiões.

5.2.1.4 Diagramas TS

A figura 51 mostra os diagramas de temperatura e salinidade (TS) construídos a partir de todos os dados de salinidade e temperatura obtidos durante as campanhas de verão e inverno. As campanhas de verão apresentaram três massas de água distintas. A água tropical (AT), com salinidades maiores que 36 g/kg e temperaturas acima de 24°C (EMILSSON, 1961). Água de plataforma (AC), com salinidades entre 35 g/kg e 36 g/kg e temperaturas maiores que 20°C (EMILSSON, 1961; MIRANDA 1982). E a água costeira, com salinidades menores que 35 g/kg e temperaturas acima de 15°C. Durante o inverno houve predomínio da água costeira.

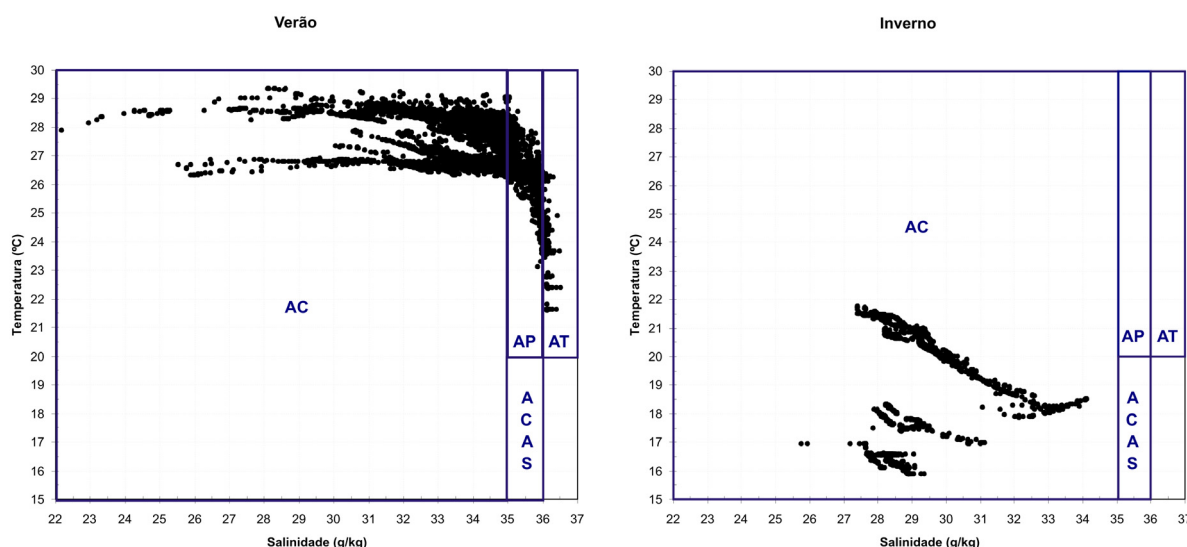


FIGURA 51 – DIAGRAMAS TS PARA TODOS OS DADOS DE TEMPERATURA E SALINIDADE OBTIDOS DURANTE AS CAMPANHAS DE VERÃO E INVERNO. (MASSAS D'ÁGUA: AC – ÁGUA COSTEIRA, AP – ÁGUA DE PLATAFORMA, AT – ÁGUA TROPICAL, ACAS – ÁGUA CENTRAL DO ATLÂNTICO SUL).

5.2.1.5 Número de Froude densimétrico

Plumas costeiras podem ser classificadas como fluviais e estuarinas. No primeiro caso, há um domínio da descarga do rio sobre os efeitos de marés resultando em uma liberação direta de água doce continental em direção ao mar. No segundo caso, os efeitos das marés dentro do estuário promovem a mistura da maior parte da água provinda da drenagem continental. Os dois tipos de plumas podem ocorrer num mesmo local dependendo das variações na amplitude da maré e vazão de água doce (MANN; LAZIER, 1991).

Quando os rios alcançam o oceano, a diferença de densidade entre água doce e salgada apresenta um impedimento do transporte em direção ao mar da água doce e sua carga de sedimentos. Em estuários com moderada descarga de água doce e considerável intrusão salina, é comum que os sedimentos sejam aprisionados no limite em direção à terra da intrusão salina, formando uma feição conhecida como zona de máxima turbidez (ZMT). Em grandes rios como o Amazonas, a vazão de água doce é tão grande que impede a intrusão de água salgada, permitindo que os sedimentos escapem diretamente para o oceano. Outros sistemas estuarinos, como o rio Mississipi, alternam entre estes dois modelos dependendo da variação sazonal na vazão do rio, aprisionando sedimentos no estuário durante condições de baixa vazão, e expelindo sedimentos para a plataforma continental em episódios de grande fluxo de água (GIBBS, 1970; WRIGHT, 1971; GEYER; KINEKE, 1995).

O balanço entre o fluxo de água doce que sai e o fluxo de água salgada mais densa que entra é expresso pelo número de Froude densimétrico:

$$F_0 = \frac{U_R}{((\Delta\rho/\bar{\rho})gh_0)^{1/2}} \quad (2)$$

onde U_R é a velocidade do fluxo de saída, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre a água doce e salgada, $\bar{\rho}$ é a densidade média, g é a aceleração da gravidade e h_0 é

a profundidade da coluna d'água. Armi e Farmer (1986) mostraram que para um fluxo constante com $F_0 \geq 1$ a frente salina é detida, impedindo a entrada de água salgada rio acima. As marés complicam um pouco as condições frontais. Em rios de vazão muito forte como o Mississipi ou o Amazonas, as condições frontais continuam ocorrendo mesmo com as marés. (WRIGHT, 1971; GEYER; KINEKE, 1995) Porém, condições críticas para a frente são determinadas por uma velocidade real que envolve uma combinação de descarga de água doce e correntes de vazante. As condições de frente estacionária descritas por Armi e Farmer (1986) são mantidas durante a vazante, mas a frente avança em direção a terra durante a enchente. No estuário do Rio Fraser, com amplitude de maré de 4 metros, a frente salina migra mais de 18 km estuário adentro durante as marés enchentes (GEYER; FARMER, 1989).

Pode a baía de Paranaguá se comportar como um rio e impedir a entrada da cunha salina? Para tentar responder esta pergunta foi calculado o número de Froude densimétrico para a desembocadura sul do CEP para as campanhas do dia 15/02/07 e 04/03/07. Os valores obtidos de F_0 foram 0.42 e 0.37, respectivamente. As outras campanhas não puderam ser utilizadas nos cálculos devido a problemas na medição das correntes conforme já apresentado anteriormente.

Para estas duas situações, com maré vazante de sizígia e grande aporte de água doce, o fluxo de saída não teve competência para deter a frente salina, como indicam os valores de F_0 encontrados. Porém, é preciso ressaltar que os cálculos foram feitos a partir de dados obtidos em um período de precipitação considerado abaixo da média histórica, não sendo possível determinar como seria o comportamento da frente salina em um ano com grande volume de precipitação.

Resultados semelhantes foram encontrados para a baía Chesapeake, EUA, por Schubel (1972). Segundo este autor estuários largos e profundos como a baía Chesapeake nunca tem uma vazão forte o suficiente para empurrar a frente salina para próximo da desembocadura. A saída de sedimentos para o mar é limitada à fração fina que permanece no fluxo de superfície durante eventos de alta vazão (STUMPF, 1988).

5.3 EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DAS ESTRUTURAS HIDROGRÁFICAS

As campanhas de campo foram realizadas com pequeno intervalo de tempo entre si. Não raro foram realizadas em dias seguidos, e até mesmo, em algumas situações, com mais de uma no mesmo dia. Isto permitiu um acompanhamento da evolução temporal da estruturas hidrográficas ao longo do transecto amostral.

Para facilitar a interpretação dos dados, foi escolhida uma forma de representação gráfica de maneira a permitir a sobreposição das estruturas hidrográficas observadas ao longo do tempo juntamente com principais variáveis causadoras de variabilidade.

5.3.1 Representações gráficas

As figuras 53 e 54 representam, respectivamente, a salinidade e a temperatura em toda a coluna d'água, para cada estação amostral, ao longo do tempo. Os gráficos T1 a T10 representam cada uma das estações amostrais e as linhas pontilhadas verticais indicam cada uma das campanhas realizadas durante o verão de 2007. Na parte superior da figura, no eixo 'x', é mostrada a data referente a cada levantamento. Quando há mais de um levantamento para a mesma data, esta é seguida pela letra 'B'. Os retângulos de cor cinza indicam que determinada estação não foi amostrada naquela data. Sendo assim, a estação T4 foi amostrada em todas as 22 campanhas e a estação T10 somente nas três primeiras. Na parte inferior da figura são apresentados três gráficos. O primeiro mostra a velocidade de subida ou descida da maré no ciclo em que foi realizada a amostragem. Esta "velocidade de mudança da maré" é aqui definida como sendo a amplitude da maré em metros dividida pelo tempo em horas entre duas estofas (preamar e baixa-mar) consecutivas. A escolha deste parâmetro se deu através da análise dos registros maregráficos. Foi constatado que marés de mesma amplitude não necessariamente possuem o mesmo tempo de vazão ou enchente, o que ocasiona diferenças também na magnitude das correntes. Assim, a escolha do parâmetro "velocidade da maré" é mais adequado como indicativo indireto das velocidades de correntes no interior do estuário do que a utilização da amplitude. A figura 52 exemplifica através da sobreposição das duas variáveis (velocidade de mudança da maré e amplitude da

maré), que elas nem sempre são coincidentes. Por exemplo, pode-se verificar que durante as campanhas de nº 13 a 16, a amplitude de maré é praticamente a mesma, porém o tempo entre as estofas de um mesmo ciclo difere consideravelmente.

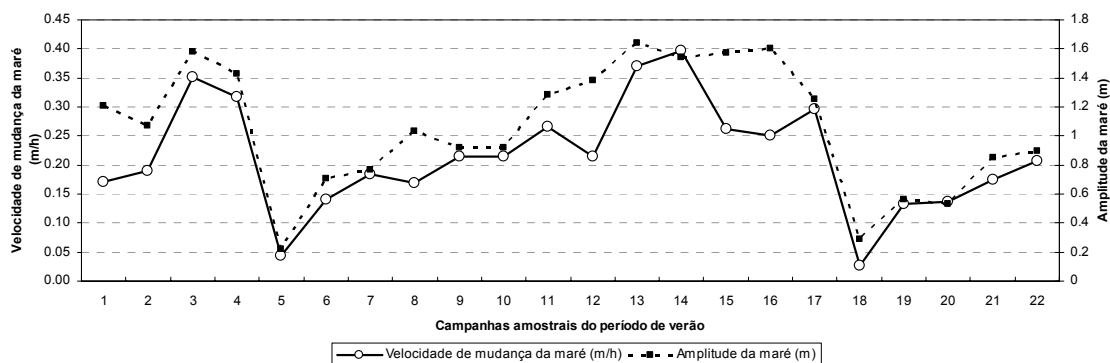


FIGURA 52 – DIFERENÇA ENTRE A AMPLITUDE DA MARÉ E VELOCIDADE DE MUDANÇA DA MARÉ.

FONTE: PARANAGUÁ PILOTS (2007) – DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

No segundo gráfico, logo abaixo da velocidade de mudança da maré, é representado o nível do mar no momento da amostragem, ou altura instantânea da maré, em metros, registrado pelo marégrafo da Ilha do Mel, tendo como zero o nível de redução da Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil para o porto de Paranaguá. Também é mostrada a situação da maré no momento da aquisição dos dados, sendo classificada em S – sizígia, Q – quadratura, V- vazante, E- enchente, B – baixa-mar, P - preamar e M – meia maré (ou maré parada - sem variação).

No último gráfico, na parte inferior da figura, estão plotados os dados de precipitação total acumulada nos sete dias anteriores para as localidades de Antonina e Pontal do Sul, e também a direção média dos ventos com velocidades maiores que 3m/s nos dois dias anteriores à amostragem, registrados pela estação meteorológica do Centro de Estudos do Mar em Pontal do Sul. Ventos abaixo desta intensidade não foram considerados devido à grande variabilidade em sua direção. Uma análise no banco de dados mostrou que os ventos de velocidade menor que 3m/s ocorrem principalmente durante as primeiras horas da manhã e estão associados à inversão térmica devido ao resfriamento do continente durante a noite, sendo pequeno o seu papel na determinação das estruturas hidrográficas abordadas neste trabalho.

5.3.2 Campanhas de verão

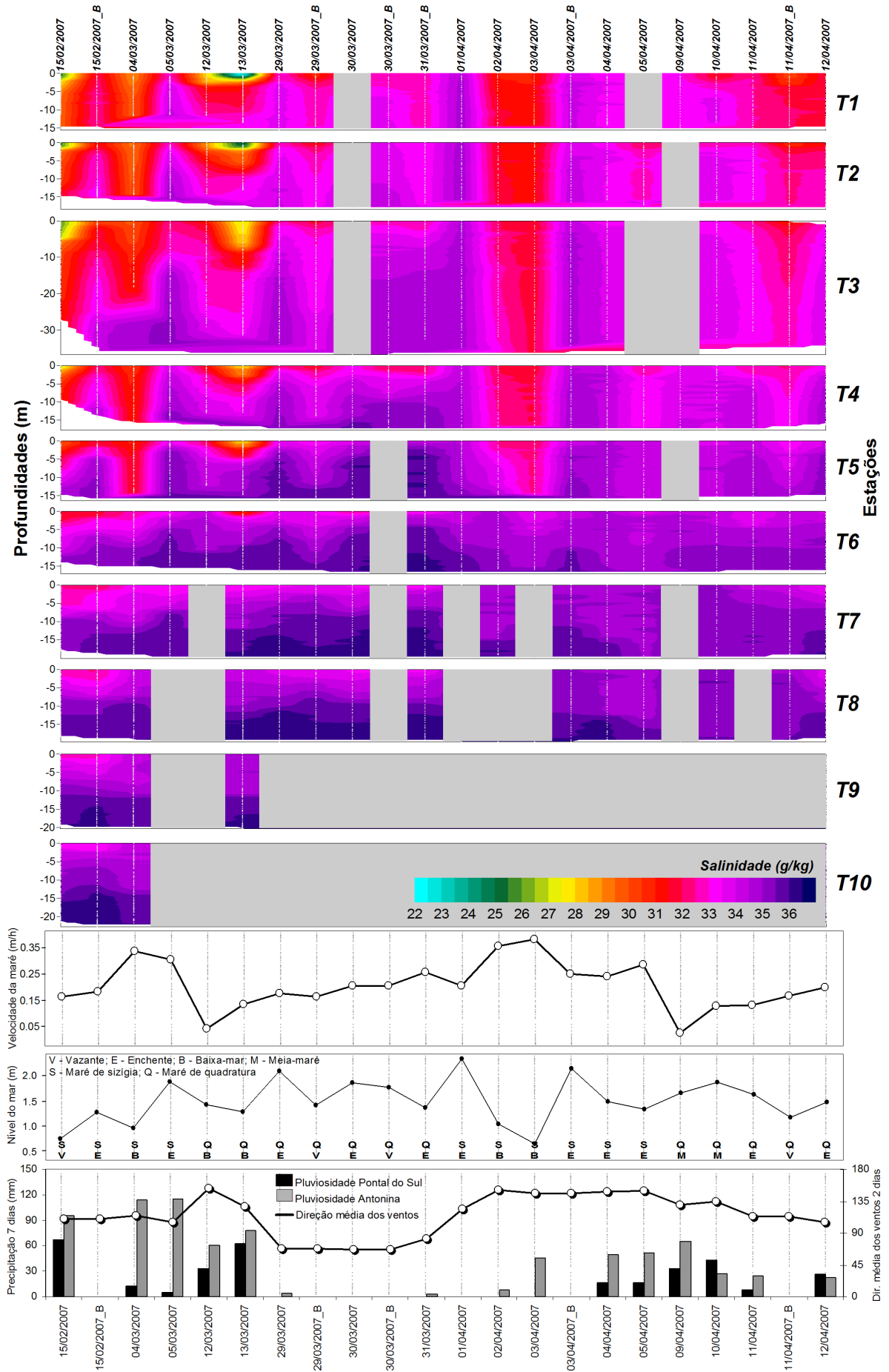


FIGURA 53 – EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA SALINIDADE E INDICADORES DINÂMICOS DURANTE AS CAMPANHAS DE VERÃO

Os dois tipos de pluma descritos por Yankovsky e Chapman (1997) foram observados na desembocadura sul do Complexo Estuarino de Paranaguá. Durante as marés de quadratura a pluma estuarina adquire a forma de advectada à superfície. Durante as marés de sizígia a estratificação é menor e a pluma comporta-se como advectada ao fundo, saindo do estuário por toda a coluna d'água. Devido às correntes de maré apresentarem ciclos de quadratura-sizígia e a descarga de água doce apresentar variações temporais, as plumas variam entre os dois estados. Ocorreram plumas advectadas à superfície na desembocadura da baía em períodos de maré de quadratura, especialmente depois de elevada descarga de água doce, quando o gradiente horizontal de salinidade aparece bastante realçado. Nas vazantes de sizígia a estratificação é quebrada, e a pluma deixa o confinamento do estuário misturada por toda a coluna d'água. Correspondências semelhantes entre as velocidades das correntes de maré e a estratificação salina ou tipo de pluma formada na desembocadura, advectada ao fundo ou advectada à superfície (conforme a classificação de Yankovsky e Chapman, 1997) também foram encontradas por Guo e Valle-Levinson (2007) na baía Chesapeake e por Kirincich e Hebert (2005) no estreito de Long Island, ambas localizadas nos EUA. No interior do CEP Mantovanelli (1999), estudou a influência das marés na estratificação salina, concluindo que durante as sizígias a estratificação era quebrada devido à maior intensidade das correntes.

Durante as enchentes de sizígia, a estratificação salina é maior do que nas vazantes, isso ocorre devido à penetração da cunha salina pelas camadas de fundo. Nas campanhas realizadas próximas às preamares a coluna d'água aparece geralmente bem misturada entre as estações T1 e T4. Exceções foram encontradas durante períodos de elevada descarga de água doce. Ocorre estratificação salina e saída da pluma estuarina pela camada superficial mesmo próximo às preamares de sizígia. Este processo é bem visível na campanha do dia 15/02/07. Pode-se notar que existe uma camada superficial de baixa salinidade, detectada até a superfície da estação T10. Esta estação está situada a 25 km do início do transecto, aproximadamente 22 km da desembocadura sul do estuário.

Verifica-se uma influência nítida da descarga estuarina ocorrendo até a estação T5. A partir da estação T6 a influência estuarina restringe-se à camada superficial e a dinâmica de plataforma passa a dominar os processos de mistura. Apenas após eventos extremos de precipitação ocorrem sinais de água estuarina na superfície das estações mais externas.

Neste estudo, foi possível observar que processos distintos determinam o grau de estratificação. Entre as estações T1 e T5, onde a influência estuarina é dominante devido à proximidade com a desembocadura, a amplitude da maré, e mais ainda, a velocidade de subida ou descida (medida indireta, que reflete a intensidade das correntes de maré) é determinante para o grau de estratificação. Na região de transição entre o estuário e plataforma verifica-se que a descarga continental elevada, das bacias próximas à desembocadura, que sai do estuário pela camada superficial, mantém a estratificação mesmo durante as vazantes de sizígia, como no caso do dia 15/02/07. Durante as enchentes de sizígia a estratificação é realçada pela intrusão da cunha salina, porém em determinados casos, a coluna d'água encontra-se bem misturada durante as enchentes de sizígia, principalmente quando a campanha era realizada próximo ao horário da preamar. Nas estações situadas na plataforma, entre T6 e T10, a dinâmica da estratificação não é determinada pela maré, e sim pelo padrão de ventos e de agitação marítima.

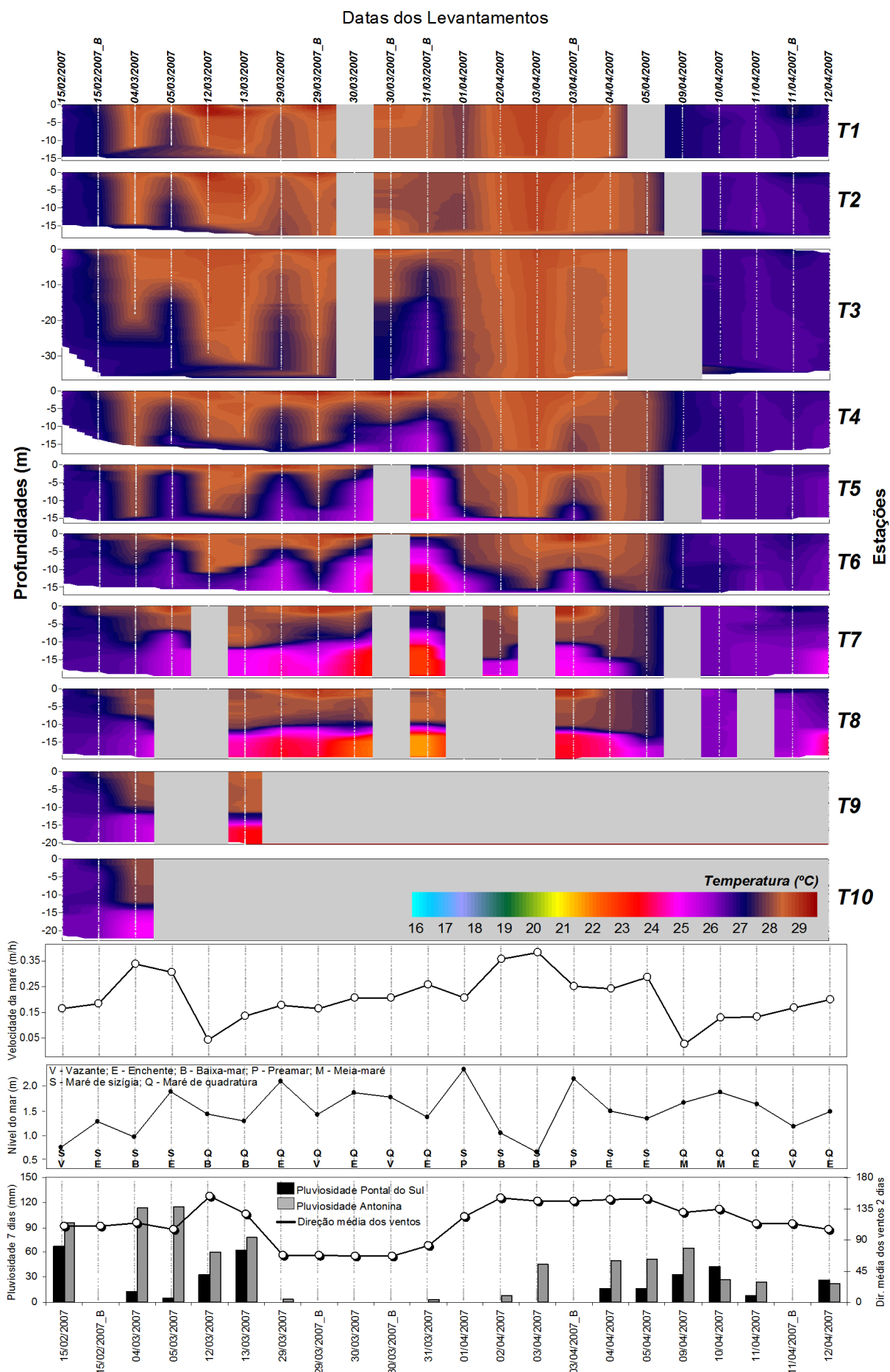


FIGURA 54 – EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA E INDICADORES DINÂMICOS DURANTE AS CAMPANHAS DE VERÃO

Na figura 54 é possível notar um aumento das temperaturas em toda a coluna d'água e em todas as estações entre os dias 15/02/07 e 04/03/07. A temperatura superficial permanece acima dos 28°C na camada superficial em praticamente todas as estações até o dia 09/04/07 quando sofrem uma ligeira queda. O mês de março apresentou as temperaturas superficiais mais elevadas, diferindo um pouco de trabalhos anteriores realizados em regiões próximas. No interior do CEP, Noernberg (2001) constatou que as temperaturas médias da coluna d'água são maiores durante o mês de janeiro para os anos de 1998, 1999 e 2000. Brandini *et al.* (no prelo) encontrou os maiores valores de temperatura superficial, para o ano de 1998, na plataforma interna paranaense durante o mês de fevereiro. Porém, como neste trabalho não foram realizadas campanhas durante o mês de janeiro, não é possível afirmar se realmente março se comportou como o mês com as maiores temperaturas na coluna d'água. Através da análise das variáveis atmosféricas verificou-se que março foi o mês de temperaturas médias do ar mais elevadas.

Durante os levantamentos realizados no período da tarde é possível visualizar o aquecimento das camadas superficiais pela radiação solar, conforme já descrito anteriormente. Segundo Critchfield (1983) a temperatura das águas superficiais é influenciada pelos processos de interação entre a água e o ar, sendo a radiação solar a principal responsável pelo aquecimento. Mantovanelli 1999 analisando as temperaturas superficiais no interior da baía de Paranaguá verificou que o maior aquecimento das águas superficiais ocorre entre 12 e 17h, independente do estado da maré.

As duas termoclinas simultâneas (bem visíveis nos dias 29 e 30 de março e 03 de abril nas estações T7 e T8) são causadas por processos distintos. A termoclina localizada próxima à superfície é causada pelo aquecimento da camada superficial através da radiação solar e a termoclina na camada de fundo pelo regime de ventos que resulta na intrusão de águas mais salinas e frias.

Em estudo realizado na plataforma continental interna paranaense, Brandini *et al.* (no prelo) descrevem o processo de intrusão da Água Central do Atlântico Sul durante o verão em períodos com dominância de ventos do quadrante nordeste. Um

processo similar regido pelo vento pode ser verificado entre as estações T5 e T10. É possível visualizar a intrusão de águas mais frias pela camada de fundo. Este processo progressivo de intrusão causado pelos ventos, predominantemente de direção nordeste, chega ao seu máximo no dia 31/03/07, onde é possível visualizar a presença de uma água mais fria nas camadas de fundo da estação T3. Este processo é interrompido no dia 01/04/07 com a mudança na direção dos ventos. A partir do dia 09/04/07 é possível notar uma quebra da estratificação e também uma diminuição das temperaturas em toda a coluna d'água ao longo de todo o transecto amostral. Isto foi ocasionado pela passagem de um sistema frontal pela região no dia 04 de abril. A temperatura média do ar passa de 27°C no dia 3 de abril para 22°C no dia 6. Isso pode ter colaborado para a redução das temperaturas na coluna d'água, porém, é a intensificação dos ventos de direção sul e sudoeste juntamente com a agitação marítima que ocorre após a passagem da frente, os principais fatores responsáveis pela erosão da termoclina e mistura de toda a coluna d'água. Com a quebra da estratificação, as águas de fundo com temperaturas inferiores a 25°C, são misturadas ao restante da coluna d'água diminuindo as temperaturas em todo o transecto.

Poucos dias após a passagem do sistema frontal, com os ventos diminuindo de intensidade e mudando novamente de direção, a estratificação aumenta nas estações T7 e T8. Isto ocorre ou pela retomada do processo de intrusão, ou simplesmente pela força restauradora do gradiente de densidade, que atua com a diminuição da turbulência.

A estratificação salina visível na estação T1 e T2 no dia 10 e 11/04/07 é devida à baixa amplitude da maré e à precipitação ocorrida nos dias anteriores, o que ocasiona a saída de uma água de baixa salinidade pela camada superficial, sem ser completamente misturada na coluna d'água.

5.3.3 Campanhas de inverno

As figuras 55 e 56 representam, respectivamente, a evolução espaço temporal da salinidade e temperatura ao longo das campanhas de inverno. Também são apresentados os indicadores dinâmicos descritos na seção 5.3.1

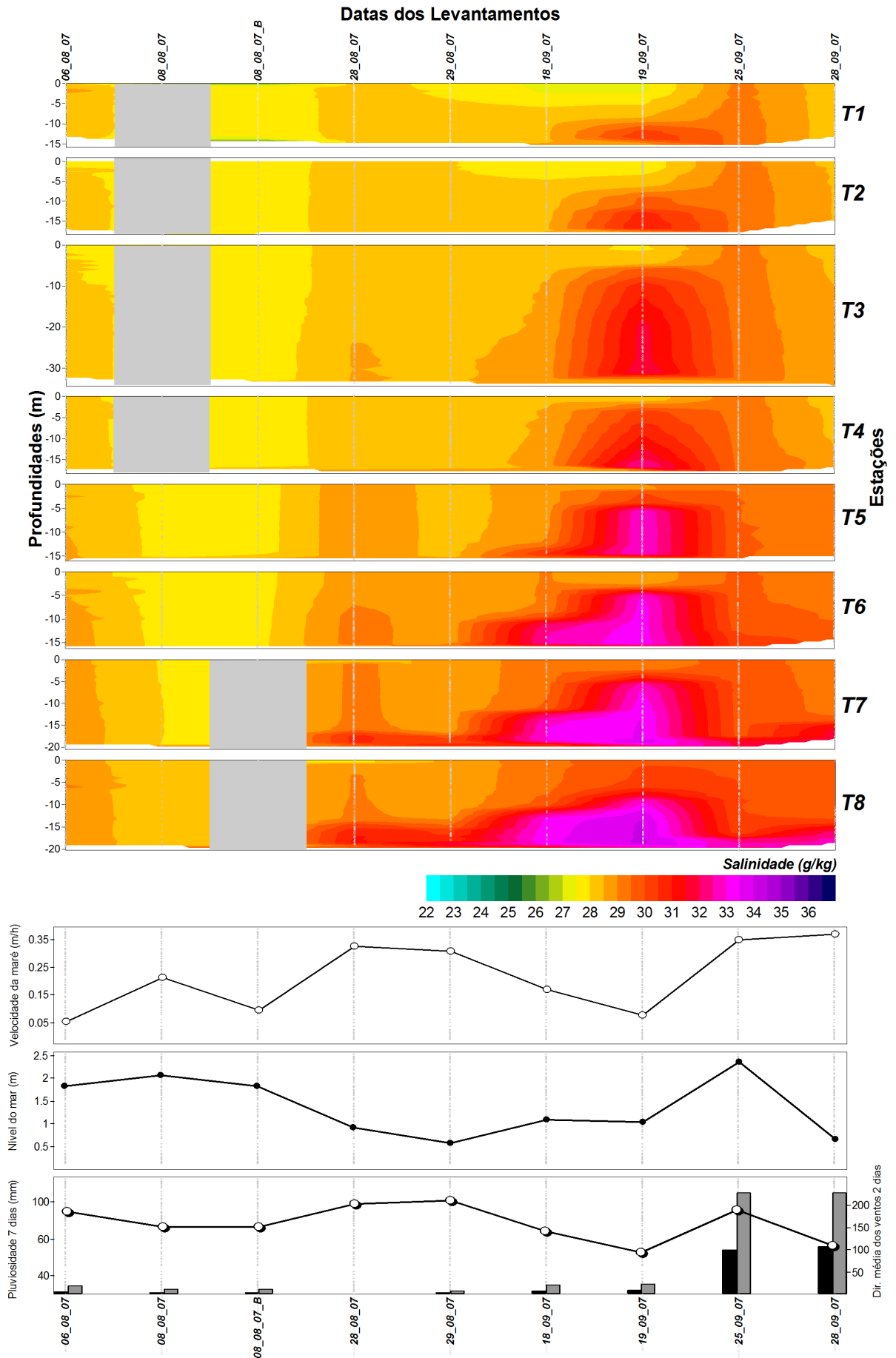


FIGURA 55 – EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA SALINIDADE E INDICADORES DINÂMICOS DURANTE AS CAMPANHAS DE INVERNO

Durante o inverno a salinidade apresenta-se bem misturada em todas as estações nas três primeiras campanhas. Uma estratificação mais pronunciada é detectada a partir do dia 28 nas estações T7 e T8. A estrutura hidrográfica apresenta-se semelhante no dia 29/08/07 com pequena redução nas salinidades e temperaturas. As condições ambientais mostradas nos gráficos representados na parte inferior da figura mostram que houve pouca variação em relação ao dia anterior, apenas a maré apresentando-se um pouco mais baixa e com uma pequena ocorrência de pluviosidade, fatores que em conjunto podem ter causado a diminuição da salinidade observada em praticamente todas as estações. A partir do dia 18/09/07 as estações T5, T6, T7 e T8, situadas na plataforma, começam a exibir uma estratificação mais pronunciada. No dia 19/09/07 este processo se acentua, sendo possível notar a estratificação ocorrendo em todas as estações, com os gradientes mais acentuados ocorrendo próximos à superfície. Como a altura da maré é praticamente a mesma do dia anterior, provavelmente este aumento da estratificação foi causado pela diminuição na intensidade das correntes de maré. Pode se notar no registro mareográfico que o tempo entre preamar e baixa-mar é significativamente mais lento comparado ao dia anterior, processo também mostrado no gráfico de velocidade de mudança da maré na figura 55. Também foi fundamental para o aumento da estratificação a mudança na direção dos ventos durante o dia 18/09/07, passando de direção sul para nordeste e mantendo-se neste quadrante durante toda a noite.

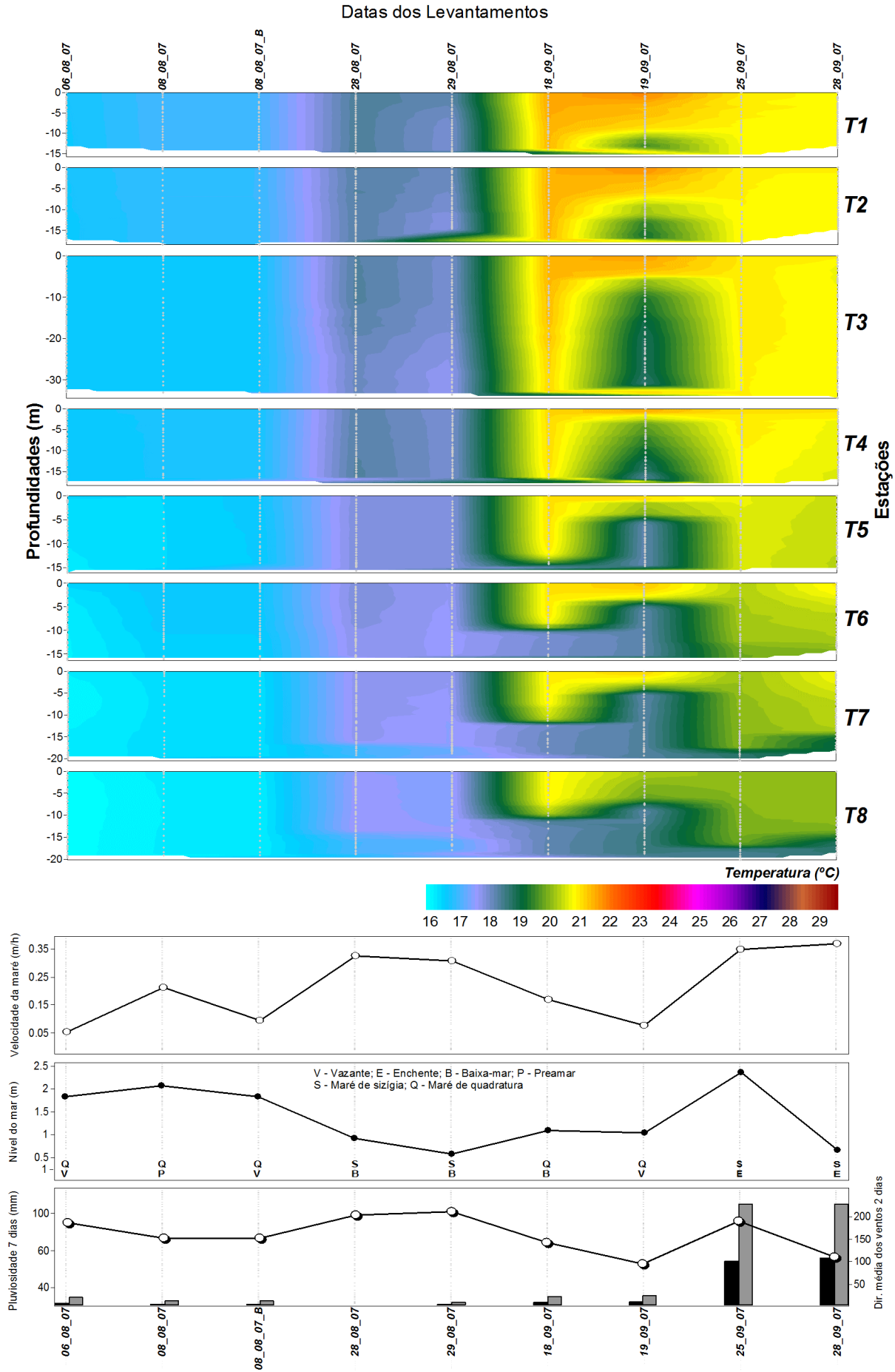


FIGURA 56 – EVOLUÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA E INDICADORES DINÂMICOS DURANTE AS CAMPANHAS DE INVERNO

A campanha do dia 25/09/07 foi realizada com mar bastante agitado, e com fortes ventos do quadrante sul, que sopraram durante toda a noite anterior devido à passagem de um sistema frontal pela região. Esta condição climática, associada às correntes mais intensas de maré de sizígia, reflete-se na estrutura hidrográfica onde é possível visualizar que a haloclina e a termoclina estão restritas a uma camada muito próxima ao fundo somente nas estações T7 e T8, com a coluna d'água bem misturada em todas as outras estações. No dia 28/09/07 com a diminuição da ondulação e da intensidade dos ventos a termoclina e a haloclina começam a se desenvolver novamente, ficando um pouco mais próximas à superfície em comparação ao dia 25/09/07, nas estações T7 e T8. Entre as estações T1 e T5 a coluna d'água apresenta-se bem misturada, reflexo das fortes correntes de maré vazante que não permitem o desenvolvimento da estratificação. Como o levantamento foi realizado próximo ao momento da estufa de maré baixa de sizígia as salinidades também são reduzidas em comparação ao levantamento anterior.

Noernberg (2001), já havia relatado, para estações situadas no interior do CEP, uma estratificação salina maior durante os meses de verão.

Apesar da precipitação registrada pelas estações meteorológicas durante as campanhas de inverno ter sido muito menor do que durante o período de verão, as salinidades médias da coluna d'água de todo o transecto foram menores durante o inverno. Como a drenagem continental é praticamente a única fonte de água doce para o sistema costeiro, como explicar essa baixa salinidade encontrada em um período onde as chuvas foram praticamente ausentes na região? A hipótese mais provável é que essas águas de baixa salinidade tenham origem na drenagem continental ao sul da área de estudo. Sua presença na região pode ser explicada pela persistência dos ventos de direção sul durante o inverno, os quais empurram, junto à costa em sentido norte, grandes quantidades de águas de plataforma, combinadas com a descarga continental rica em nutrientes, sendo que os principais contribuintes são os estuários do Rio da Prata e da Lagoa dos Patos. Essas águas são caracterizadas por suas baixas salinidades e temperaturas e alta turbidez (PIOLA *et al.*, 2000). A presença dessas águas durante o inverno já havia sido descrita na plataforma interna e mediana paranaense por Brandini *et al.*, (no prelo).

Ventos predominantes do quadrante sul favorecem o acúmulo da água costeira, e também interrompem a penetração de águas mais salinas da ACAS e AT sobre a plataforma, reduzindo a salinidade próximo à costa.

Através da análise de uma imagem obtida pelo sensor MODIS, a bordo do satélite Acqua, de 22 de agosto de 2006, foi confirmada a presença de águas costeiras de alta turbidez na plataforma interna sul e sudeste brasileira (FIGURA 57). Infelizmente devido às condições atmosféricas adversas, não foi possível a obtenção de uma imagem sem cobertura de nuvens durante o inverno de 2007, o que permitiria afirmar com certeza a presença desta massa d'água durante o período em que as campanhas de campo foram realizadas.

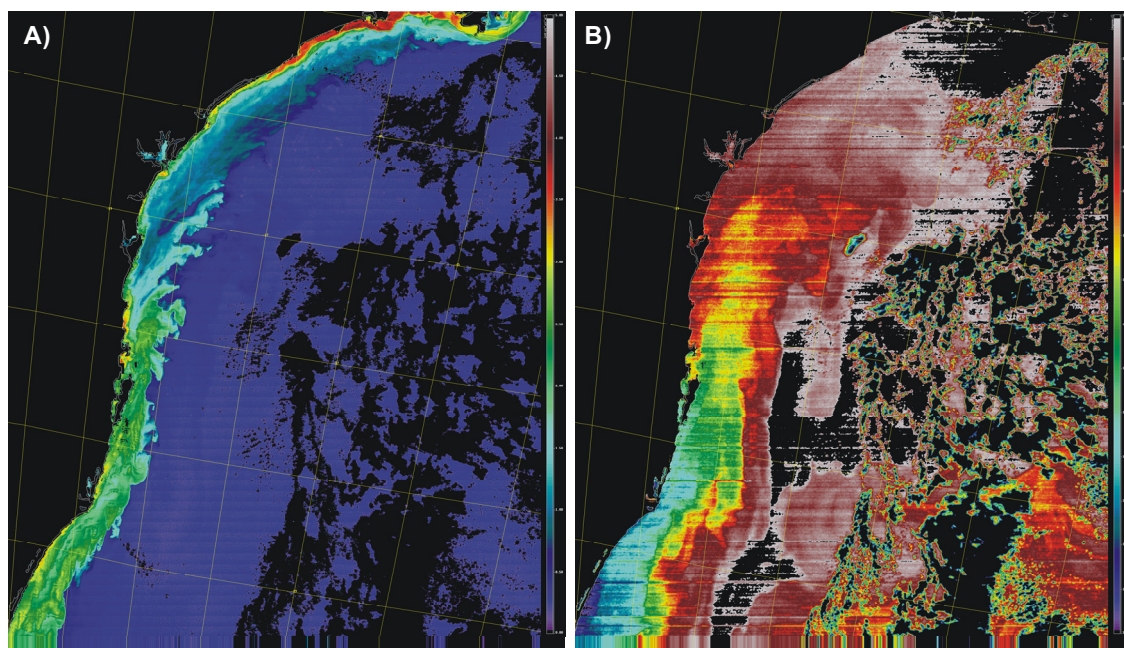


FIGURA 57 - IMAGEM MODIS DE 22 DE AGOSTO DE 2006 MOSTRANDO A PRESENÇA DE ÁGUAS COSTEIRAS SOBRE A PLATAFORMA PARANAENSE DURANTE O INVERNO. A) TURBIDEZ REPRESENTADA PELOS ELEVADOS VALORES DE nLw 555. B) TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DO MAR ($^{\circ}C$).

5.3.4 Resposta da estrutura hidrográfica às variáveis ambientais

Uma série de matrizes de correlação foram montadas para se tentar avaliar o tempo de resposta da estrutura hidrográfica às principais variáveis ambientais

(marés, precipitação e ventos). Um resumo dos resultados obtidos nestas matrizes de correlação é apresentado e discutido a seguir.

5.3.4.1 Influência da precipitação

A figura 58 mostra a variação do coeficiente de correlação de Pearson (r) entre a precipitação acumulada desde o dia anterior da amostragem até o décimo terceiro dia anterior e a porcentagem de água doce na coluna d'água da estação T1. São utilizados dados de precipitação de Antonina, de Pontal do Sul e a média entre as duas estações. A contribuição de água doce (AD) em % foi calculada pela fórmula $\%AD = (S - S\#n)/S$. Onde S é a maior salinidade medida no transecto e $S\#n$ é a salinidade média da coluna d'água em cada estação (OFFICER, 1975).

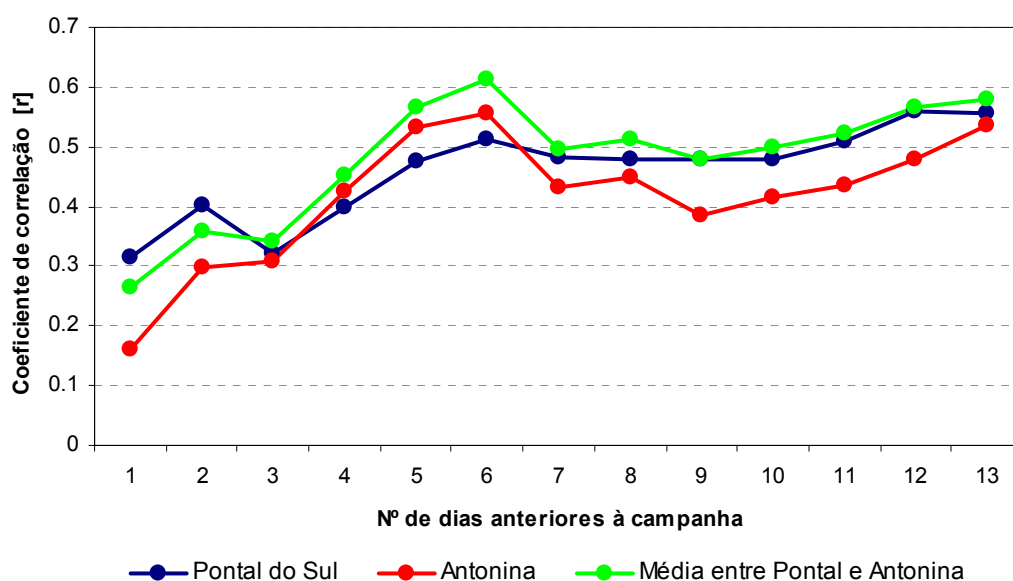


FIGURA 58 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (r) ENTRE A PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NOS DIAS ANTERIORES ÀS CAMPANHAS AMOSTRAIS E A PORCENTAGEM DE ÁGUA DOCE ENCONTRADA NA ESTAÇÃO T1.

Uma correlação positiva de 0.61 foi encontrada entre a precipitação média de Pontal do Sul e Antonina acumulada nos seis dias anteriores e a contribuição de água doce (%) em T1. O fato da correlação da média de precipitação ser maior do que as estações individualmente indica que a quantidade de água doce presente nesta região do estuário é resultado da precipitação ocorrida entre cinco e seis dias

anteriores nas diferentes bacias que drenam para dentro do CEP. Este resultado está de acordo com trabalhos anteriores realizados na região. Mantovanelli (1999), com base em regressões entre a salinidade e o aporte de água doce, inferiu que o tempo necessário para a renovação do volume de água doce do CEP situa-se entre 3 e 10 dias dependendo do aporte continental. Freitas (2007) correlacionou a turbidez de águas costeiras através de imagens de satélite com dados de precipitação e concluiu que o tempo entre um evento de precipitação e a observação dos sinais deste evento sobre a forma de turbidez na plataforma aparenta ser entre quatro e seis dias na região de Pontal do Sul.

As menores salinidades superficiais verificadas nas estações T1, T2 e T3 ocorreram após precipitação significativa em Pontal do Sul (FIGURA 53). Campanhas de campo realizadas após eventos de precipitação elevada somente em Antonina mostraram que a coluna d'água apresenta-se com salinidades relativamente baixas nas estações T1 a T3, porém com menor gradiente vertical. Diferentemente da porcentagem de água doce, que apresentou maior correlação com a precipitação média acumulada entre Pontal e Antonina, a estratificação salina em T1 (FIGURA 59), apresenta uma correlação positiva com a precipitação acumulada em Pontal do Sul, nos quatro dias anteriores, de 0.85. Isto indica que a estratificação na estação T1 tem maior correlação com chuvas que caíram nas bacias de drenagem próximas à desembocadura do estuário entre 1 e 5 dias antes da amostragem de campo. Isto ocorre porque a água doce que entra nas regiões mais internas do estuário, distantes da desembocadura, sofre maior ação dos processos de mistura, chegando à desembocadura diluída por toda a coluna d'água. Pelo mesmo motivo a água doce que entra no sistema próximo à desembocadura, sofre menos mistura pela ação das marés, ficando restrita à camada superficial, o que colabora para o aumento da estratificação salina.

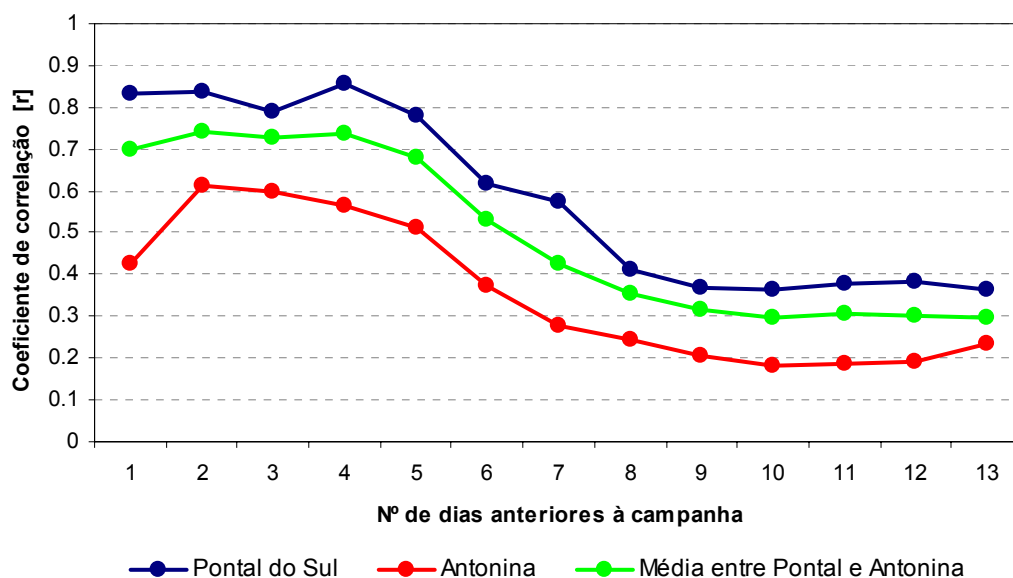


FIGURA 59 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (r) ENTRE A PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NOS DIAS ANTERIORES ÀS CAMPANHAS AMOSTRAIS E A ESTRATIFICAÇÃO SALINA NA ESTAÇÃO T1.

Devido à diluição gradativa da pluma estuarina nas águas costeiras, o que torna difícil sua delimitação, Jouanneau e Latouche (1982) sugerem que seja escolhida, para propósitos práticos, uma isohalina específica dentro do campo de salinidade encontrado na área de estudo, para ser utilizada como limite da pluma. Com base nisso, foi confeccionada uma matriz de correlação entre a precipitação nos dias anteriores à campanha e a distância em quilômetros da isohalina de 31 g/kg na superfície a partir da estação T1 em direção ao oceano. Este valor específico de salinidade foi escolhido por estar presente em todas as oito saídas de campo realizadas durante o verão em horários próximos às baixa-mares.

O maior coeficiente de correlação entre a distância da isohalina 31 g/kg em superfície a partir de T1 e a precipitação, foi encontrada para a média da precipitação acumulada entre Pontal do Sul e Antonina nos seis dias anteriores às campanhas amostrais. A figura 60 mostra o modelo de regressão linear encontrado entre estas duas variáveis, que apresentou um coeficiente de correlação ajustado (r^2) de 0.90. Apesar do pequeno número de observações ($n=8$) utilizado no modelo, este resultado indica a distância a partir da desembocadura onde as águas estuarinas são encontradas flutuando sobre a camada superficial da plataforma (na direção do fluxo principal de saída), ou seja, o alcance da influência da pluma em direção ao

mar aberto é função da precipitação acumulada nos seis dias anteriores nas bacias que drenam para dentro do complexo estuarino. É importante salientar que os dados foram obtidos em marés de sizígia e quadratura e sob condições de vento do quadrante nordeste na maioria dos levantamentos.

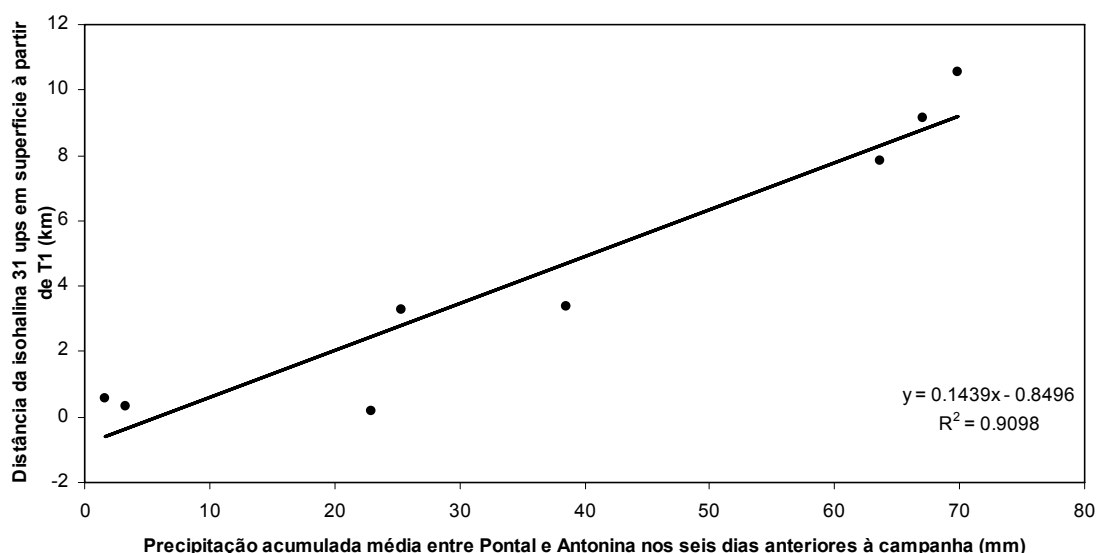


FIGURA 60 – MODELO DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE A PRECIPITAÇÃO MÉDIA DE PONTAL DO SUL E ANTONINA NOS SEIS DIAS ANTERIORES ÀS CAMPANHAS DE CAMPO E A DISTÂNCIA DA ISOHALINA 31 g/kg A PARTIR DA ESTAÇÃO T1 EM DIREÇÃO AO MAR ABERTO.

5.3.4.2 Influência das marés e ventos

De acordo com Mann e Lazier (1996) o grau de estratificação em sistemas estuarinos depende basicamente do equilíbrio entre a força restauradora do gradiente de densidade que tende a manter a estratificação e o efeito da turbulência gerado pelos gradientes de velocidade. Foi encontrada uma correlação negativa de -0.40 entre a amplitude de maré e a estratificação salina em T1. Esta correlação sobe para -0.45 quando ao invés da amplitude é considerada a velocidade de mudança da maré em metros por hora (calculada dividindo a amplitude pelo tempo entre as estofas de preamar e baixamar consecutivas). Isso leva a crer que a velocidade de subida ou descida da maré, é mais importante para as velocidades das correntes do que somente a amplitude. Porém, a moderada correlação entre estas duas variáveis e a estratificação salina indica que o aporte de água doce também exerce influência significativa na estratificação de sistemas estuarinos. Deve-se levar em conta a

proximidade da estação com a desembocadura, o que facilita a ocorrência da cunha salina, principalmente durante as marés enchentes, aumentando a estratificação. Quando considerados somente os dados obtidos durante as baixa-mares o coeficiente de correlação entre velocidade da maré e estratificação em T1 sobe para -0.67. Na região do CEP próxima à Paranaguá, menos influenciada pela cunha salina Mantovanelli (1999), através de regressões múltiplas, encontrou uma correlação r^2 de 0.95 entre amplitude da maré em conjunto com o aporte de água doce e a estratificação salina vertical.

A estratificação salina média entre as estações T7 e T8 apresentou coeficiente de correlação de 0.03 com a amplitude da maré, indicando que a maré não exerce praticamente nenhuma influência na estratificação das estações situadas na plataforma. Castro *et al.* (2005) afirma que na plataforma continental sudeste brasileira é o padrão de ventos e a agitação marítima que determinam a estratificação. Durante o verão, ventos predominantes de nordeste empurram as águas superficiais em direção ao mar aberto de acordo com o modelo de Ekman. Isto é balanceado pela intrusão nas camadas de fundo da ACAS, causando uma forte estratificação termal (CASTRO *et al.* 1987). Com base nesse pressuposto, foi montada uma matriz de correlação entre as estratificações salinas e termais médias entre as estações T7 e T8 e a direção média dos ventos, maiores que 3 m/s, acumulada nos dias anteriores à amostragem. O resumo desta matriz de correlação é apresentado na Figura 61.

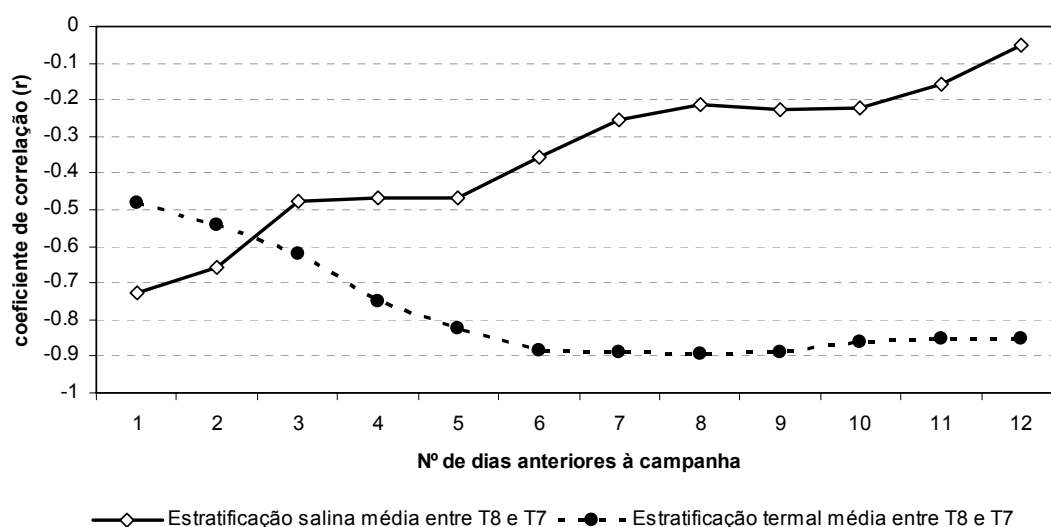


FIGURA 61 – EVOLUÇÃO TEMPORAL DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON (r) ENTRE A ESTRATIFICAÇÃO SALINA E TERMAL MÉDIA NAS ESTAÇÕES T7 E T8 E A DIREÇÃO MÉDIA DOS VENTOS MAIORES QUE 3m/s ACUMULADA NOS DIAS ANTERIORES À AMOSTRAGEM

Foi encontrada uma correlação negativa entre direção do vento e estratificação termal. Essa correlação é de apenas 0.47 quando considerada a média de direção dos ventos somente do dia anterior à campanha. O coeficiente aumenta linearmente até o sexto dia anterior, mantendo-se elevado ($r > 0.89$) até o nono dia, com pequena queda nos dias subseqüentes. A correlação é negativa devido à direção dos ventos estar expressa em graus, portanto quanto menor o valor, mais favorável é o vento para o processo de ressurgência. A estratificação salina apresenta a maior correlação com a direção dos ventos no dia anterior à campanha, com progressiva diminuição conforme um maior intervalo de tempo é considerado. Provavelmente isto ocorreu devido à salinidade na camada de fundo destas estações ter apresentado, considerando todos os dados de verão, variação de 1g/kg, enquanto a temperatura apresentou variação de 4.88°C. Nas figuras 53 e 54 é possível visualizar o processo de intrusão destas águas de fundo favorecidas pela atuação dos ventos do quadrante nordeste, porém o processo progressivo de intrusão verificado na estação T8 entre os dias 13/03/07 e 31/03/07 é mais nítido na temperatura do que na salinidade devido à amplitude de variação. A temperatura sofre uma contínua diminuição enquanto a salinidade permanece essencialmente a mesma. O comportamento do coeficiente de correlação indica que a intrusão de águas frias e salinas pela camada de fundo da plataforma é um processo progressivo que se intensifica conforme aumenta o período de domínio dos ventos gerados pelo anticiclone tropical, ocorrendo, portanto, de maneira sazonal já que no inverno a passagem mais freqüente das frentes impede um maior desenvolvimento desse processo de intrusão.

Apesar desta água de fundo ter características TS que a enquadram como Água Tropical (EMILSSON, 1961) é muito provável que, devido aos pares TS estarem próximos aos limites, seja uma mistura desta massa d'água com a Água Central do Atlântico Sul (10-20°C; 35-36g/kg) (SVERDRUP *et al. op cit.*; EMILSSON, 1961). Um intenso gradiente termal foi encontrado na camada de fundo entre estações T7 e T8 nos dias 31/03/07 e 3/4/07. Supõe-se que se estações um pouco

mais distantes da costa tivessem sido amostradas, seria detectada a presença da ACAS. Estas suposições fundamentam-se no trabalho de Brandini *et al.* (no prelo), que detectaram a presença da ACAS, e a conseqüente formação de um máximo sub-superficial de clorofila, na plataforma paranaense, na camada de fundo de uma estação na isóbata de 25m durante o verão e após a predominância de ventos de nordeste. Segundo os autores, o processo de intrusão não ocorreu durante períodos de persistência de ventos do quadrante sudeste, mesmo durante o verão.

Se este raciocínio estiver correto, pode-se afirmar que os intensos gradientes termais observados são na verdade a estrutura que Castro (1996) definiu como Frente Termal de Fundo (FTF), zona de transição entre a ACAS e a AC, onde a termoclina intercepta o leito marinho.

A formação dos máximos sub-superficiais de clorofila em vastas áreas do Embaio Sul Brasileiro suporta o crescimento do náuplios e copépodes, as mais importantes presas para larvas de peixes de importância comercial como a sardinha (*Sardinella brasiliensis*) e a anchova (*Engraulis anchoita*). (MATSUURA, 1982; CAMPANER; HONDA, 1987; MATSUURA, 1991,1996; KURTZ; MATSUURA, 2001) Nos eventos de *El-niño* a persistência dos ventos NE diminuem, restringindo a formação dos máximos. Consequentemente, as taxas de recrutamento de sardinhas podem ser afetadas (MATSUURA, 1996). Durante as campanhas de campo do presente trabalho, pescadores locais relataram que após períodos de persistência de ventos do quadrante nordeste, aumentou a captura, em áreas da plataforma interna, de peixes por eles descritos como sendo característicos de águas frias.

5.4 COMPORTAMENTO DA PLUMA SOBRE A PLATAFORMA ATRAVÉS DE IMAGENS DO SENSOR MODIS

Para uma melhor compreensão dos padrões de dispersão horizontal da pluma estuarina do CEP, foram utilizadas 24 imagens obtidas pelo sensor MODIS a bordo do satélite Acqua, entre janeiro e maio de 2007.

A imagem do dia 14/01/07 (FIGURA 62) foi obtida às 14:30h, horário local. Não foi possível observar nesta imagem, níveis elevados de nLw555, devido à turbidez ou a presença de feições que poderiam ser caracterizadas como a pluma

do CEP. Provavelmente, isto ocorreu devido ao baixo índice de precipitação registrado nos dias anteriores, e à maré de quadratura, com amplitude de 0.5 m. Nestas condições de maré, as correntes raramente têm competência para remobilizar e suspender os sedimentos (NOERNBERG, 2001). Pode-se observar que os maiores índices de nLw555 ocorrem sobre os deltas arenosos, regiões bastante rasas existentes na desembocadura do CEP, e são causados pela interação da radiação eletromagnética com o fundo. No restante da área a reflectância é bastante baixa. A feição em forma de meia lua existente próxima à desembocadura sul do CEP, associada ao banco arenoso, está presente em praticamente todas as imagens analisadas e já havia sido descrita por Freitas (2007).

Na imagem do dia 30/01/07 é possível visualizar uma região de níveis elevados de nLw555 em frente à desembocadura do CEP (FIGURA 62). A turbidez costeira é atribuída à elevada precipitação registrada em todas as estações meteorológicas nos quatro dias anteriores. Apesar de esta imagem ter sido obtida em uma situação de preamar de quadratura, o ciclo anterior de maré apresentou uma vazante intensa, com estufa de baixa-mar às 10:36h, possibilitando a saída de águas de baixa salinidade responsáveis pelos elevados índices de nLw555. Durante esta vazante anterior à aquisição da imagem os ventos tinham direção oeste/sudoeste com intensidade média de 3m/s, condição que facilita a saída da água estuarina. As 12:00h o vento muda sua direção para sul e no momento da aquisição da imagem a direção é sudeste com intensidade de 5m/s.

No dia 01/02/07, os altos níveis de nLw555 (FIGURA 62) ainda são devidos às chuvas intensas dos últimos dias (FIGURA 63). Pode se notar que o alcance da pluma em direção ao mar aberto é maior do que na imagem anterior. Três fatores podem explicar isto: o intervalo de tempo maior entre a precipitação e a aquisição da imagem, a amplitude da maré e o regime de ventos. Pode se notar maiores índices de nLw 555 próximos à desembocadura norte do CEP, provavelmente causados pela elevada precipitação nas bacias que drenam para as baías de Laranjeiras e Pinheiros, como sugerem os dados de precipitação dos três dias anteriores para Guaraqueçaba, ocasionando provavelmente a saída de maior volume de águas de baixa salinidade pelas desembocaduras situadas ao norte.

Durante a maré vazante que precedeu a aquisição da imagem os ventos tinham direção média de 353° e intensidade de 2.5 m/s, favorecendo a dispersão da pluma na direção sul/sudeste. A partir das 12:00h os ventos passam a soprar da

direção leste/sudeste (direção média 108°), com intensidade média de 4.6m/s . Esta inversão no sentido dos ventos ocasiona um aumento nos processos de mistura da pluma com as águas da plataforma. Este aumento nas taxas de mistura é visível nas “línguas” de sentido horário visualizadas em frente à desembocadura sul do CEP e no suave gradiente de turbidez em direção ao mar aberto.

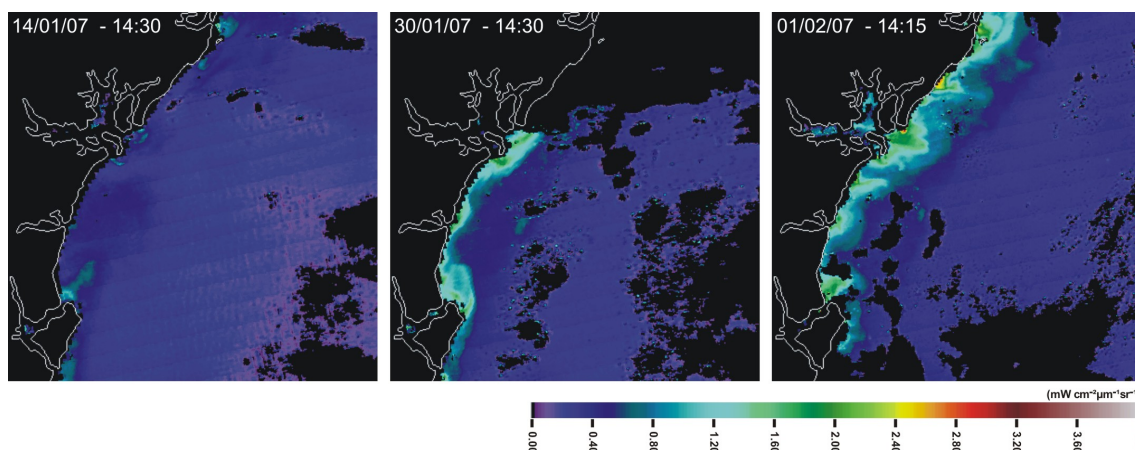


FIGURA 62 – IMAGENS DO SENSOR MODIS OBTIDAS NOS DIAS 14/01, 30/01 E 01/02/2007, REALÇANDO A TURBIDEZ COSTEIRA. VALORES ELEVADOS DE NLW555 INDICAM MAIORES QUANTIDADES DE MATERIAL EM SUSPENSÃO.

FONTE: NASA (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

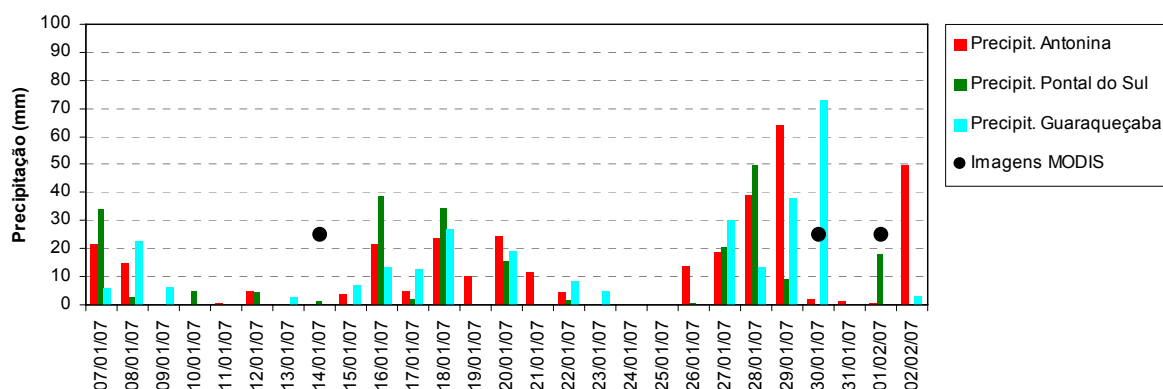


FIGURA 63 – DATAS DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS MODIS E PRECIPITAÇÃO ACUMULADA NOS DIAS ANTERIORES

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA (2007) SIMEPAR (2007) IAPAR (2007) – DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

Na imagem do dia 03/02/07 ainda é possível notar a influência da precipitação dos dias anteriores na região de Guaraqueçaba, responsável pelos altos índices de $nLw555$ próximos à desembocadura norte do CEP. A direção média dos ventos, nas

horas que antecederam a aquisição da imagem, foi de 139° , com intensidade média de 3.4 m/s. Esta condição de vento do quadrante sudeste é responsável pelo deslocamento da pluma junto à costa em sentido norte observado na imagem. Condições de vento semelhantes antecederam a imagem do dia 22/02/07, resultando numa dispersão da pluma, em sentido norte, parecida com a imagem de 03/02/07 (FIGURA 64). A precipitação elevada registrada nos quatro dias anteriores também nas estações de Antonina e Pontal do Sul ocasionam os valores elevados de nLw555 próximos à desembocadura sul do CEP.

A imagem do dia 06/02/07, foi obtida duas horas após a baixa-mar de sizígia. Nos sete dias anteriores foi registrada uma precipitação de 53.8, 34 e 76.2mm, para Antonina, Pontal e Guaraqueçaba, respectivamente. Durante toda a manhã os ventos tiveram direção norte/nordeste, resultando no sentido de propagação da pluma observado na imagem. O movimento anticiclônico da pluma com desvio para leste pode estar sendo auxiliado pelo efeito de Coriolis, conforme será abordado adiante.

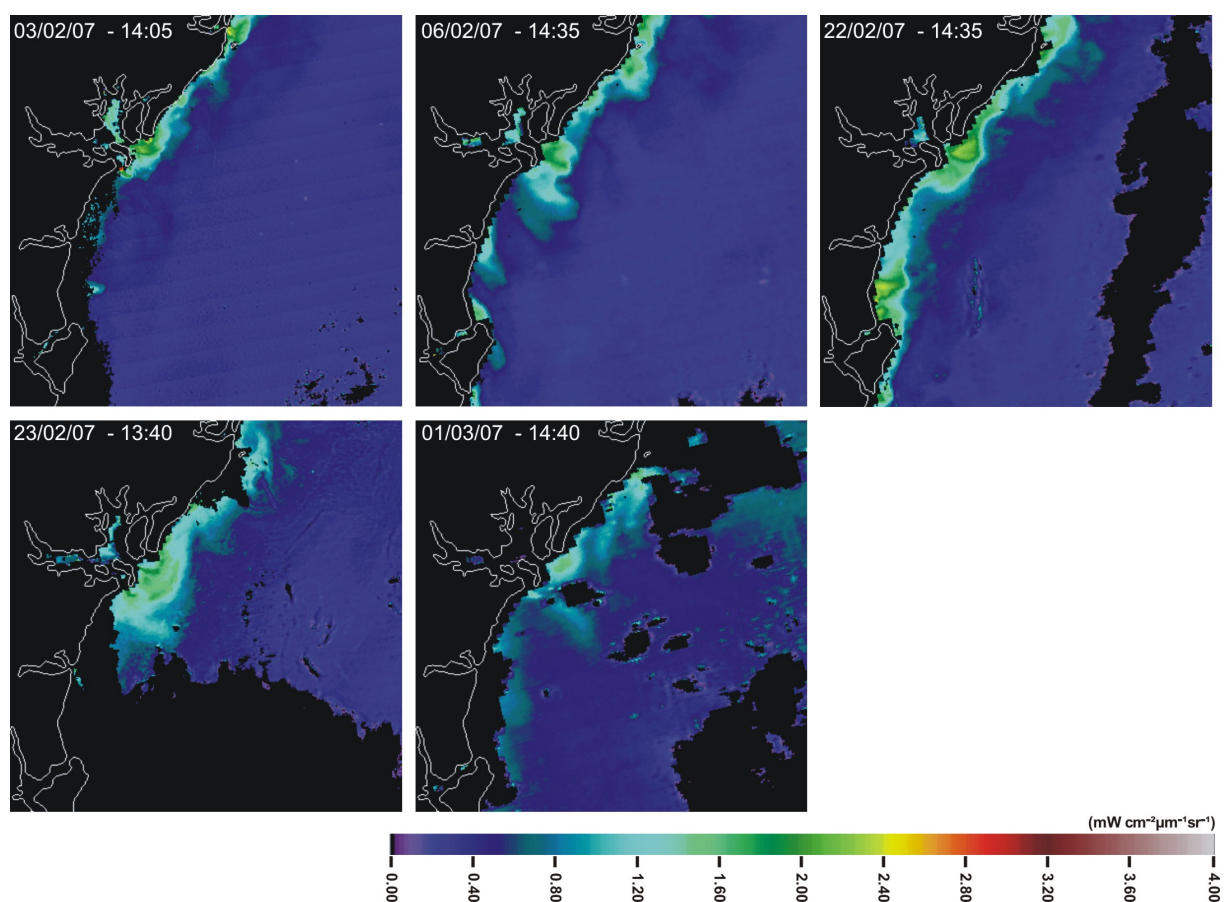


FIGURA 64 – SEQUÊNCIA DE IMAGENS DO SENSOR MODIS OBTIDAS ENTRE OS DIAS 03/02/07 E 01/03/2007, REALÇANDO A TURBIDEZ COSTEIRA. VALORES ELEVADOS DE NLW555 INDICAM MAIORES QUANTIDADES DE MATERIAL EM SUSPENSÃO.

FONTE: NASA (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

No dia 23/02/07 a imagem foi obtida durante a baixa-mar em uma maré de quadratura. Pode se notar uma língua de turbidez que se projeta na direção sudeste a partir da desembocadura do CEP (FIGURA 64). As condições do vento anteriores foram determinantes para a formação desta feição. Quando a maré começa a vaziar o vento tem direção norte/nordeste com velocidade média de 1.83 m/s. Após as 12:00h a direção do vento muda para sudeste, favorecendo a diluição da pluma nas águas da plataforma. Conforme já descrito anteriormente, durante as quadraturas, principalmente quando há registros significativos de precipitação na estação de Pontal do Sul nos dias anteriores, a água estuarina sai do CEP pela camada superficial na forma de uma pluma advectada à superfície. A concentração desta água de origem continental, com sua carga de partículas opticamente ativas, na camada superficial, é responsável pelos altos valores de reflectância observados nesta imagem. No dia 01/03/07, a precipitação que antecede a imagem tem valores significativos registrados apenas para Antonina e Guaraqueçaba. A precipitação elevada no interior do estuário associada à maré de sizígia, que atua diminuindo a estratificação, resulta na saída da água oriunda da drenagem continental diluída por toda a coluna d'água e não bem destacada das águas circundantes mais densas. Isto poderia explicar a presença desta língua de turbidez com suaves gradientes saindo da desembocadura sul do CEP na direção sudeste. Esta pluma se propagou na direção sudeste pela ação dos ventos de sentido norte/noroeste que atuaram durante a vazante no início da manhã. A partir das 11:00h a direção do vento muda para sudeste e a intensidade aumenta. Isto pode ter colaborado para o aumento da diluição desta pluma que deixou o estuário pela desembocadura sul. A turbidez não distingue a pluma das águas circundantes com gradientes abruptos no momento da aquisição da imagem, o que poderia representar uma maior atuação dos processos de mistura. Já a pluma de turbidez visível nas imediações da desembocadura ao norte da Ilha do Mel e do Canal do Superagüi, é mais destacada das águas circundantes. Talvez isso se deva às chuvas ocorridas em bacias próximas à desembocadura. Como há registro de precipitação em Guaraqueçaba nos dois dias

anteriores, esta chuva pode ter ocorrido também nas bacias que drenam para dentro da baía de Pinheiros. Apesar de não haver estudos sobre a descarga de água doce no interior da baía dos Pinheiros, a geomorfologia da região leva a crer que o tempo de resposta entre precipitação nas cabeceiras dos rios e saída desta água de baixa salinidade pelo canal do Superagüi seja bastante rápido. A forma desta pluma que sai pela desembocadura norte sugere que seu sentido de deslocamento é para norte. Provavelmente isto ocorre devido à onda de maré se propagar de sul para norte no litoral do Paraná (CAMARGO,1998), ocasionando um atraso no horário de vazante das desembocaduras norte em relação à desembocadura sul. Devido a esse efeito, a saída da água estuarina pela desembocadura situada ao norte da ilha do Mel e pelo canal do Superagüi, com a maré vazante, não teve sua dispersão influenciada pelos ventos de norte/noroeste que ocorreram no início da manhã.

Do dia 03/03/07 ao dia 07/03/07 devido à coincidência entre a geometria da órbita do satélite Aqua e as janelas atmosféricas causadas pela ausência de nuvens, foi possível obter uma seqüência diária de cinco imagens MODIS (FIGURA 65). É possível observar nesta seqüência de imagens o desenvolvimento de um evento de elevada turbidez na zona costeira paranaense.

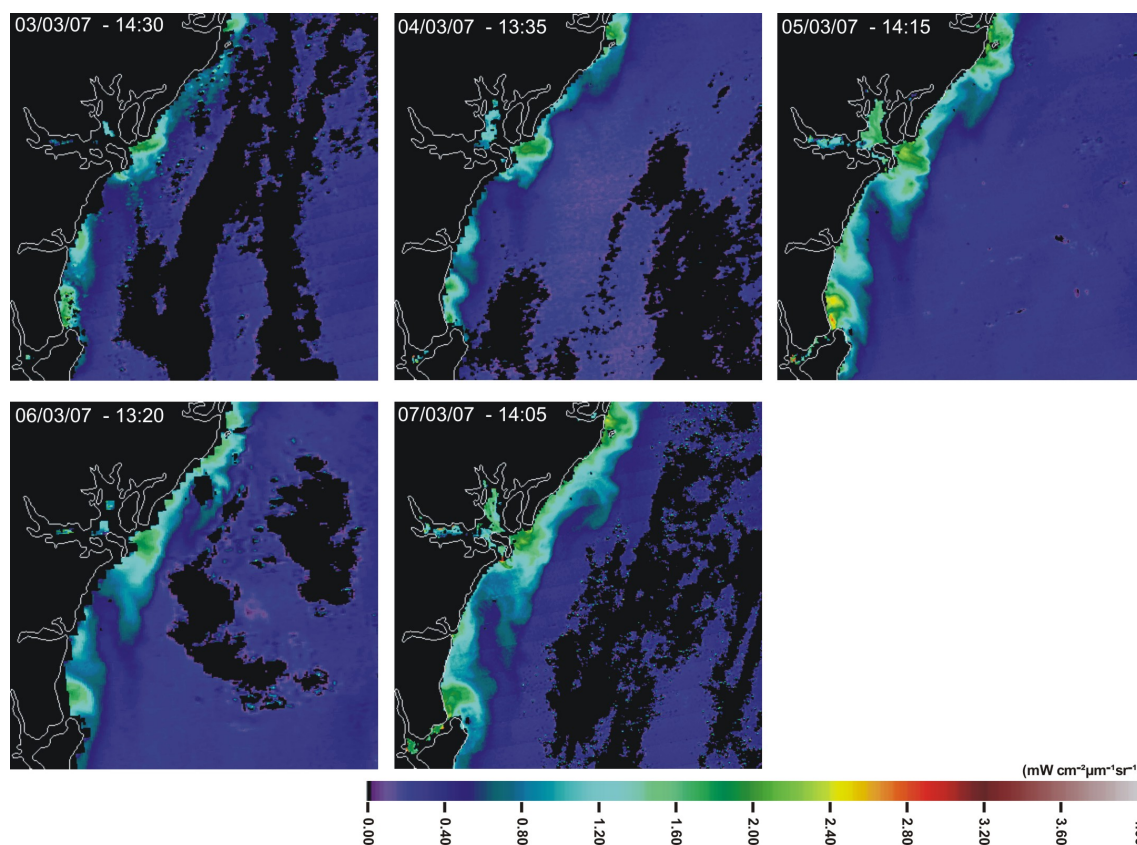


FIGURA 65 – SEQUÊNCIA DE IMAGENS DO SENSOR MODIS OBTIDAS ENTRE OS DIAS 03/03/07 E 07/03/2007, REALÇANDO A TURBIDEZ COSTEIRA. VALORES ELEVADOS DE NLW555 INDICAM MAIORES QUANTIDADES DE MATERIAL EM SUSPENSÃO.

FONTE: NASA (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

A figura 66 mostra o registro feito pela estação maregráfica da ilha do Mel neste período e o horário de passagem do satélite pela região.

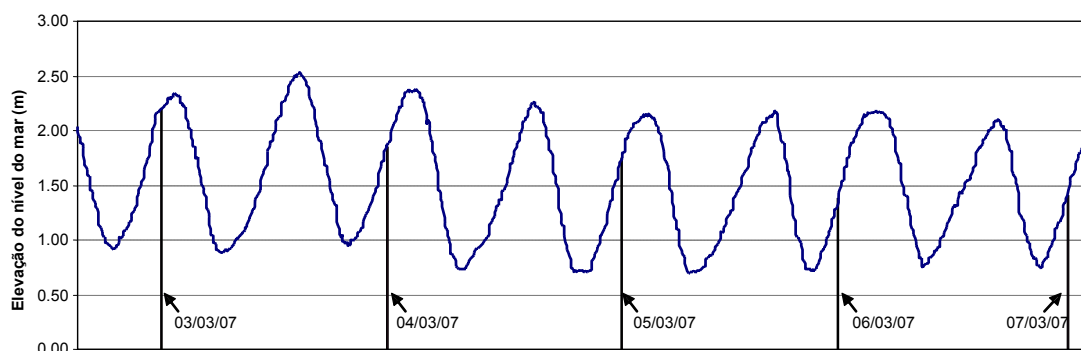


FIGURA 66 – HORÁRIOS DA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS MODIS OBTIDAS ENTRE 03/03/07 E 07/03/07 PLOTADOS SOBRE O REGISTRO MAREGRÁFICO OBTIDO PELA ESTAÇÃO DA ILHA DO MEL.

FONTE: PARANAGUÁ PILOTS (2007) – DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

É possível observar que as imagens são obtidas cada vez mais próximas ao horário de estufa de baixa mar. O nível do mar durante as estofas de baixa-mar dos dias 5, 6 e 7 está em média 0.3 metros mais baixo do que nos dias 3 e 4 de março.

A figura 67 apresenta o registro pluviométrico para o período anterior à obtenção destas imagens nas estações meteorológicas de Antonina, Pontal do Sul e Guaraqueçaba, assim como o dia da obtenção das imagens e das amostragens realizadas em campo.

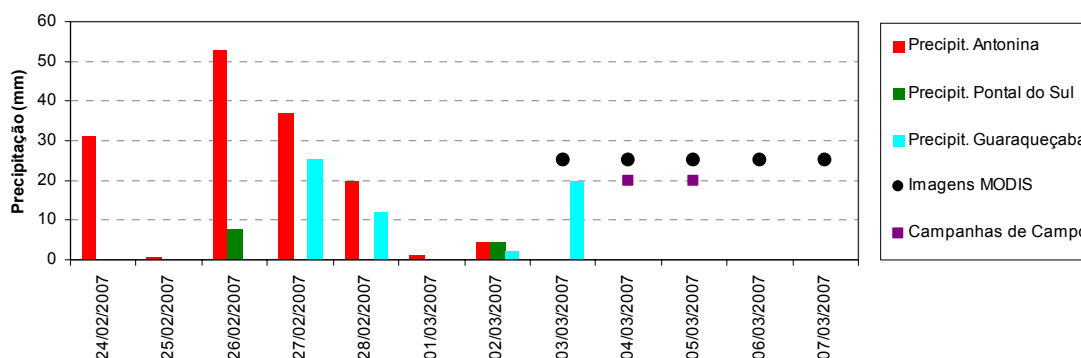


FIGURA 67 – DATAS DAS CAMPANHAS DE CAMPO E DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS MODIS E PRECIPITAÇÃO NOS DIAS ANTERIORES

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA (2007) SIMEPAR (2007) IAPAR (2007) – DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

No dia 03/3/07 o vento tem direção oeste durante a maré vazante, passando a sul e permanecendo assim até o momento da aquisição da imagem. No dia 04/03/07 o vento também tem direção oeste durante a vazante, passando a leste a partir das 11:00h. Este padrão de ventos é responsável pela retenção da pluma estuarina próxima à desembocadura visível nestas duas imagens.

No dia 05/3/07 o vento teve direção norte/nordeste desde 00:00h até as 11:00h, com intensidade média de 1.7m/s. Após às 12:00h o vento muda para leste sudeste. Este padrão de ventos ocorre de maneira semelhante durante os dias 06 e 07 de março, fazendo com que a pluma estuarina do CEP, seja empurrada para sul, influenciando as águas da plataforma interna praticamente até a divisa com o estado de Santa Catarina (FIGURA 65).

Nos dias 04 e 05 de março de 2007, também foram realizadas campanhas de campo para a caracterização hidrográfica, sendo que no dia 05 os horários das coletas de campo e da obtenção da imagem pelo satélite foram coincidentes (FIGURA 68).

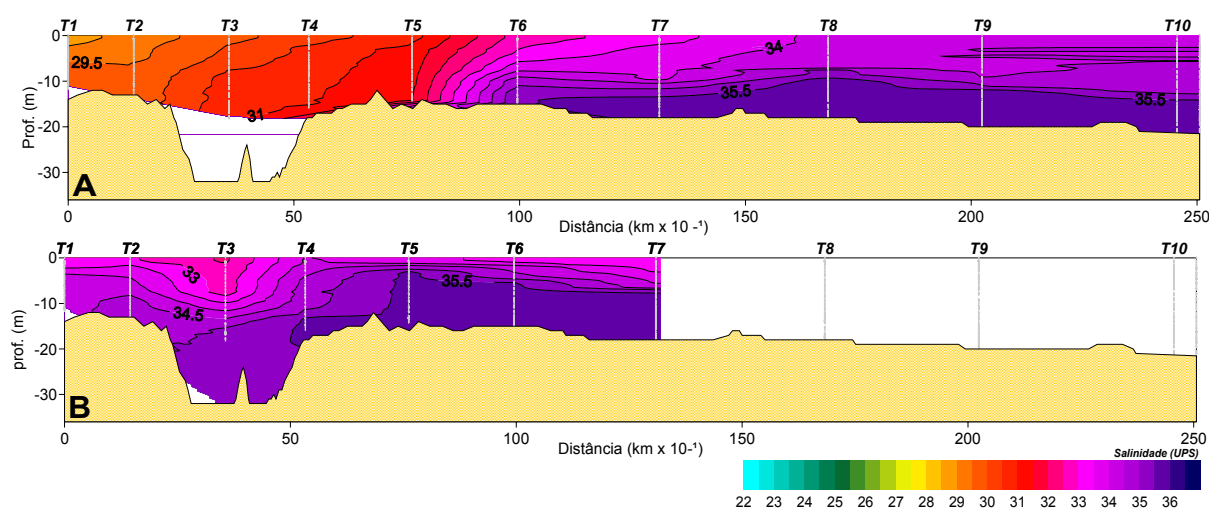


FIGURA 68 – SALINIDADE AO LONGO DO TRANSECTO AMOSTRAL NOS DIAS 04/03/07 (A) E 05/03/07 (B). NESTES DIAS TAMBÉM FORAM OBTIDAS IMAGENS MODIS, SENDO QUE NO DIA 05/03/07 OS HORÁRIOS SÃO COINCIDENTES.

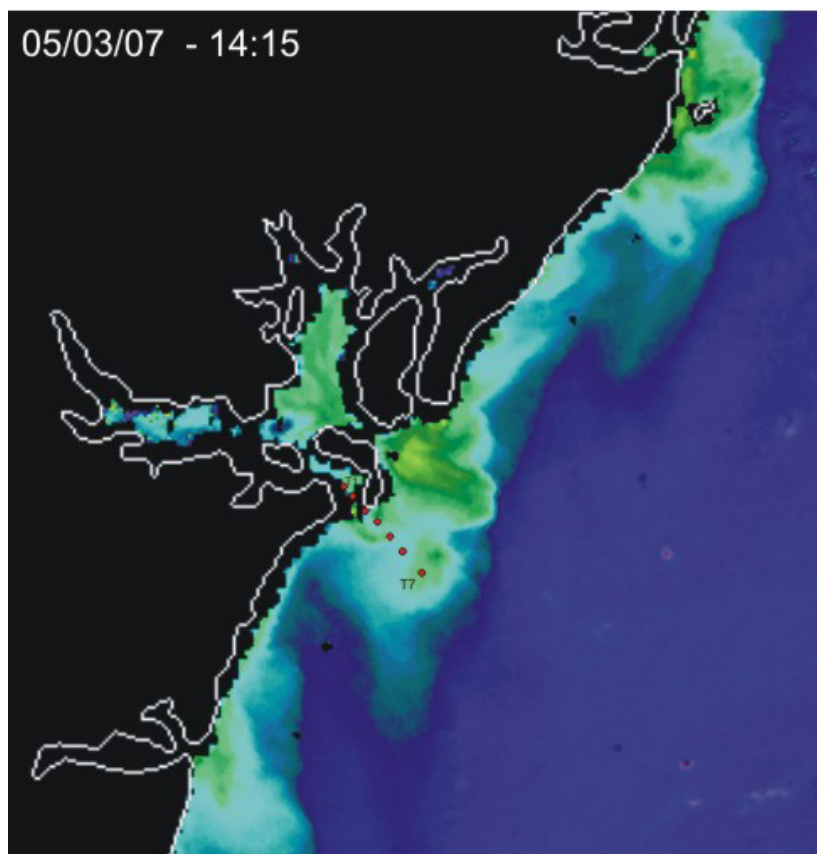


FIGURA 69 – POSIÇÃO APROXIMADA DAS ESTAÇÕES AMOSTRAIS T1 A T7 PLOTADAS SOBRE IMAGEM MODIS DO DIA 05/03/07. AS COLETAS DE CAMPO E A OBTENÇÃO DA IMAGEM OCORRERAM EM HORÁRIOS COINCIDENTES

FONTE: NASA (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

No perfil de salinidade obtido *in situ* pode-se observar que a água presente na camada superficial das estações T6 e T7 é 0.5 g/kg menor do que a camada superficial da estação T5. Provavelmente, esta água menos salina é resquício da última maré vazante. Como estas estações foram amostradas com no máximo meia hora de diferença para a passagem do satélite Acqua, é provável que a mancha de turbidez mais elevada, visível na imagem, a sudeste da desembocadura sul do CEP, na direção do transecto, possa ser atribuída a essa água de salinidade 33.5 g/kg e temperatura 29°C, já que as posições da estação T7 e a da mancha de turbidez elevada detectada pelo satélite praticamente coincidem (FIGURA 69). Este fato é uma evidência de que a água estuarina pode ser mais bem separada das águas da plataforma através de suas propriedades ópticas inerentes do que pela salinidade, que após a diluição com as águas mais salinas apresenta um contraste salino muito pequeno com as águas circundantes.

A Figura 70 apresenta as seis imagens obtidas pelo sensor MODIS entre os dias 21/03/07 e 03/04/07. Logo abaixo, a Figura 71 mostra o registro maregráfico do período e o horário de obtenção das imagens. Pode-se observar que as imagens foram obtidas durante marés de quadratura e sizígia. A figura 72 mostra o regime pluviométrico registrado em três localidades distintas para o período anterior à obtenção destas imagens. Nesta figura também estão plotados os dias em que as imagens foram obtidas e também os dias em que foram realizadas campanhas de campo.

Na imagem do dia 21/03/07 (FIGURA 70) existe uma faixa horizontal de valores nulos de nLw555 que se deve a uma falha no imageamento feito pelo sensor. Apesar desta falha não permitir visualizar a resposta espectral na região próxima à desembocadura sul do CEP, pode-se observar uma região de alta turbidez em frente à desembocadura norte e ao canal do Superagüi, que pode estar associada a uma maior saída de água de baixa salinidade por estas desembocaduras. O vento sudoeste com intensidade média de 3.6 m/s atuando na manhã do dia 21/03/07 faz com que a pluma se disperse junto à costa em sentido norte.

Na imagem do dia 23/03/07 valores elevados de nLw555 são encontrados em toda a região costeira paranaense. Durante a maré vazante que antecedeu a aquisição da imagem, os ventos tinham direção norte/noroeste, o que favoreceu a saída da água estuarina na direção sudeste. Após as 11:00h a direção média do vento muda para sudeste e aumenta de intensidade. Esta mudança na direção dos ventos faz com que a pluma seja advectada junto à costa e tenha seu sentido de propagação mudado para norte, como sugere o formato da feição de alta turbidez localizada em frente à ilha do Superagüi. Esta mudança na direção dos ventos também causa intensificação dos processos de mistura na região frontal da pluma, visível através dos gradientes de nLw555 na região externa da pluma.

No dia 25/03/07, valores elevados de reflectância são observados em praticamente toda a área coberta pela imagem. Como as condições climáticas (vento, precipitação e pressão atmosférica) não apresentaram anomalias que possam estar explicando estes altos índices de nLw555 nas regiões mais afastadas da costa, é possível que isto esteja ocorrendo devido ou à problemas de correção atmosférica da imagem, causados talvez por uma elevada concentração de vapor d'água ou aerossóis, ou ainda por um aumento da rugosidade da superfície do mar.

Nas imagens de 27/03 e 30/03/07, nota-se a dispersão da pluma em sentido sudeste, devido à atuação de ventos do quadrante nordeste durante as horas que antecederam a aquisição destas imagens. Amostragens da estrutura hidrográfica realizados em campo nos dias 29 e 30/03/07 (FIGURAS 19 E 20) mostram uma estratificação salina bastante intensa, devido à penetração de águas frias e salinas pela camada de fundo. Nas figuras relativas a essas campanhas de campo é possível notar a saída da água estuarina já bastante diluída, através de uma fina camada superficial. Esta pluma advectada à superfície atinge distâncias maiores devido à dispersão pelo vento ser mais efetiva quando a pluma está restrita à camada superficial. A pequena diferença de densidade relativa entre a pluma e as águas da plataforma, faz com que a diluição seja mais intensa, resultando nos suaves gradientes de turbidez visualizados nas imagens. No dia 03/04/07 acontece o contrário. Apesar dos ventos na manhã deste dia apresentarem direção média de norte/nordeste, os gradientes de nLw555 entre a pluma e as águas da plataforma são mais abruptos. Isto provavelmente ocorre devido à coluna d'água encontrar-se bem misturada, sem estratificação, conforme mostra a estrutura hidrográfica amostrada em campo neste dia (FIGURA 24). Isto parece indicar que quando a pluma sai do estuário advectada ao fundo, sua dispersão em direção ao largo e diluição nas águas ambientes é mais limitada do que quando ela sai pela camada superficial.

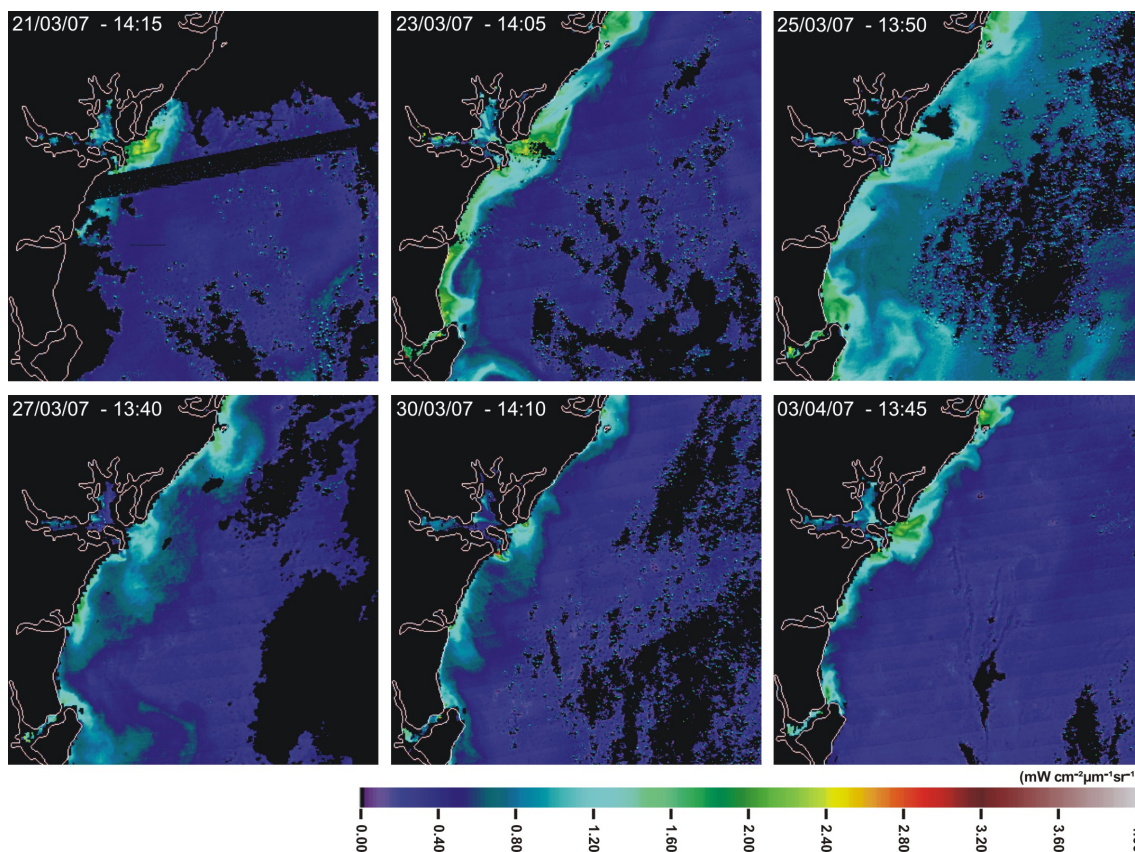


FIGURA 70 –IMAGENS DO SENSOR MODIS OBTIDAS ENTRE OS DIAS 21/03/07 E 03/04/07, REALÇANDO A TURBIDEZ COSTEIRA. VALORES ELEVADOS DE NLW555 INDICAM MAIORES QUANTIDADES DE MATERIAL EM SUSPENSÃO.

FONTE: NASA (2007) - DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

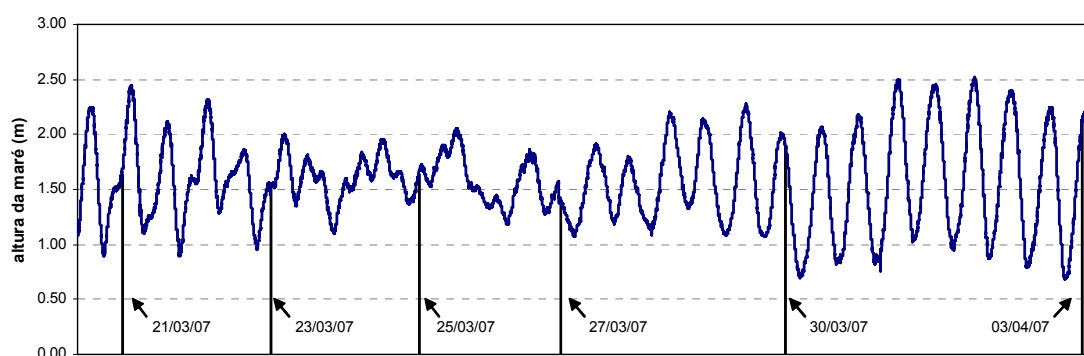


FIGURA 71 – HORÁRIOS DA AQUISIÇÃO DAS IMAGENS MODIS OBTIDAS ENTRE 21/03/07 E 03/04/07 PLOTADOS SOBRE O REGISTRO MAREGRÁFICO OBTIDO PELA ESTAÇÃO DA ILHA DO MEL.

FONTE: PARANAGUÁ PILOTS (2007) – DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

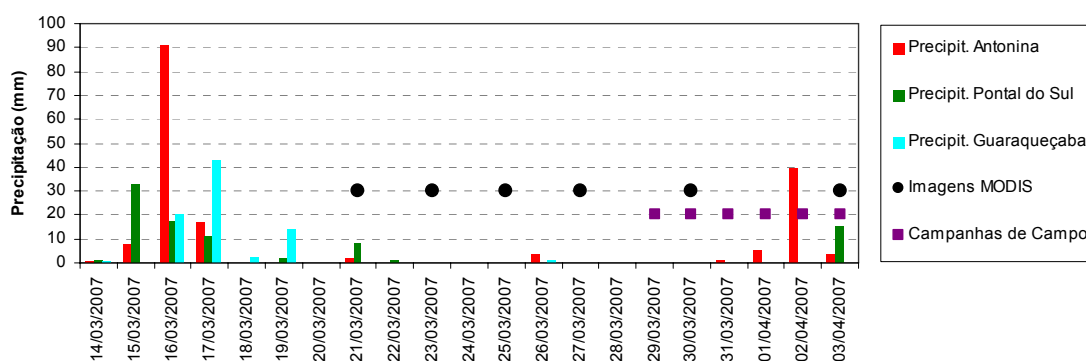


FIGURA 72 – DATAS DAS CAMPANHAS DE CAMPO E DE OBTENÇÃO DAS IMAGENS MODIS E PRECIPITAÇÃO NOS DIAS ANTERIORES

FONTE: GRUPO DE FÍSICA MARINHA (2007) SIMEPAR (2007) IAPAR (2007) – DADOS PROCESSADOS PELO AUTOR

As figuras 73 e 74 mostram a distribuição dos valores de $nLw555$ ao longo dos de dois transectos de 72 km posicionados sobre uma série de 24 imagens MODIS (maiores detalhes na seção materiais e métodos) obtidas entre janeiro e maio de 2007.

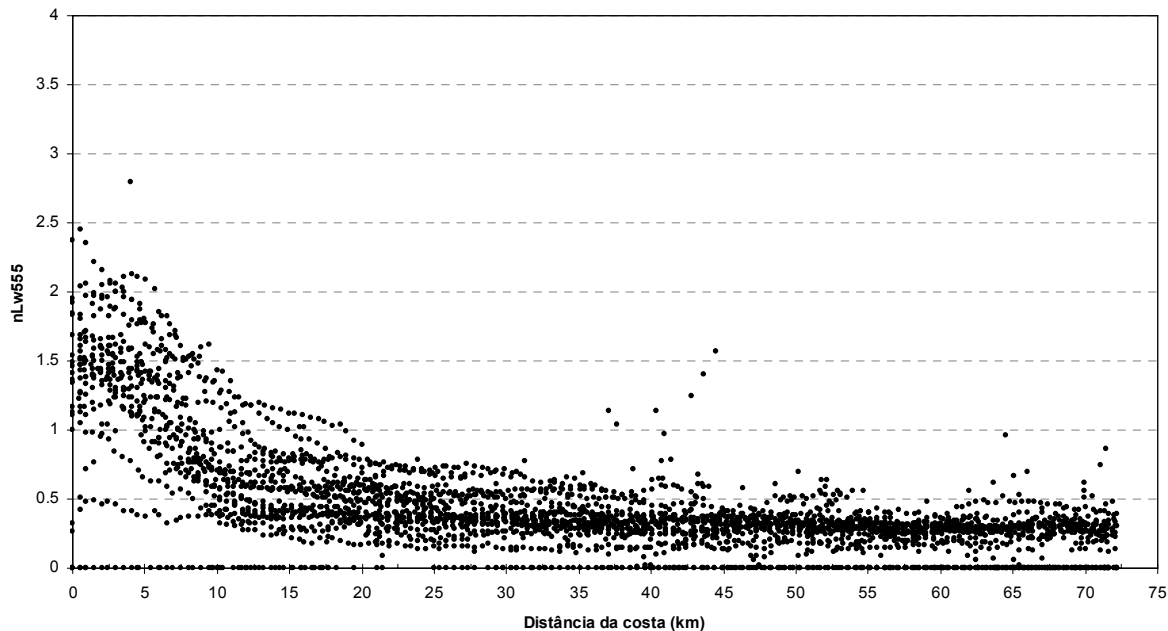


FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE $nLw555$ AO LONGO DO TRANSECTO 1

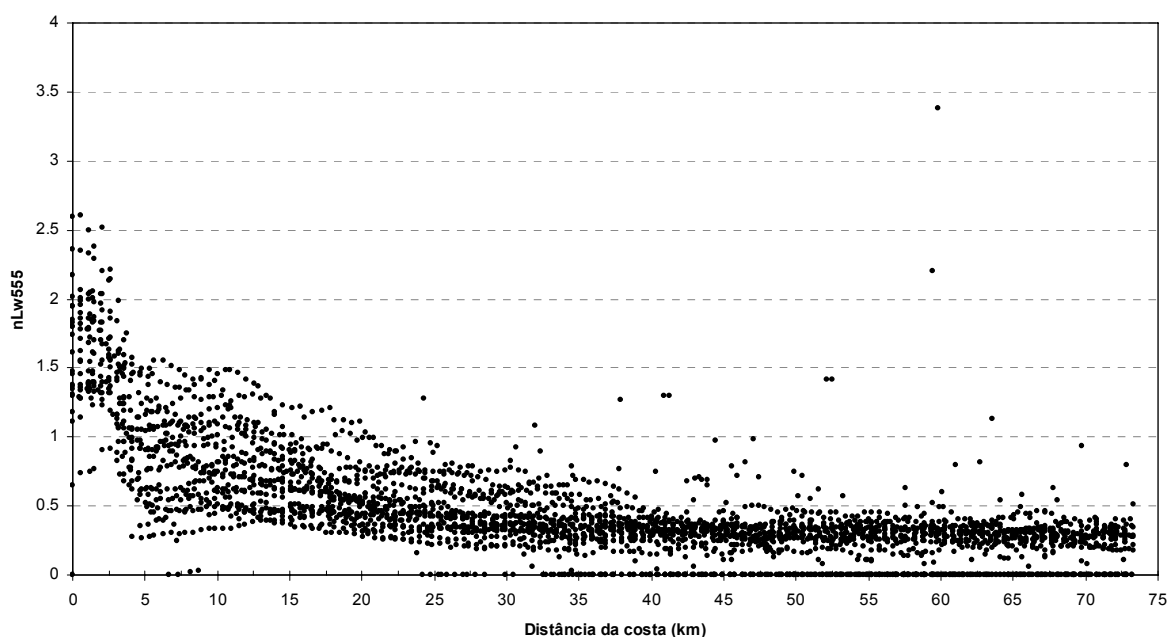


FIGURA 73 – DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE $nLw555$ AO LONGO DO TRANSECTO 2

Neste trabalho foram considerados como valores oceânicos, ou seja, sem influência costeira, os valores de $nLw555$ menores que 0.5. Regiões diretamente impactadas pela descarga estuarina apresentam valores maiores que 1. Uma discussão mais aprofundada sobre a escolha dos limiares pode ser encontrada em Nezlin e DiGiacomo (2005) e para a região de estudo em Freitas (2007).

Pode-se perceber que para a sequência de imagens utilizadas para a retirada destes valores geofísicos, a influência da turbidez costeira chega à aproximadamente 20 km da costa para os dois transectos durante os eventos mais extremos.

5.5 DISPERSÃO E VARIABILIDADE ESPACIAL DA PLUMA DO CEP

Plumas estuarinas e de rios ocorrem em uma grande amplitude de escalas espaciais e temporais. Garvine (1987) e O'Donnel (1988, 1990) classificaram as plumas em “grandes” e “pequenas” com base no número Kelvin interno da descarga, que é uma estimativa da importância da aceleração de Coriolis no balanço de momentum próximo à fonte. Segundo O'Donnel (1993) o número Kelvin é definido pela seguinte equação:

$$R_K = \frac{fL}{\sqrt{b_0 D_0}} \quad (3)$$

Onde f é o parâmetro de Coriolis para o local, L é a largura da desembocadura, $b_0 = g(\Delta_a - \Delta)/\Delta_a$, sendo que g é a aceleração da gravidade, Δ_a é a densidade da água costeira, Δ é a densidade da pluma e D é a espessura da pluma. O número Kelvin é, portanto a relação da largura da desembocadura com o raio de deformação de Rossby interno, medida usada para saber a partir de qual escala de tamanho um fluido estratificado passa a sentir os efeitos rotacionais (WISEMAN; GARVINE, 1995).

Utilizando o número Kelvin como parâmetro principal, Garvine (1995) classifica as plumas em dois tipos. As plumas do Caso 1 ($R_K << 1$) têm a dinâmica dominada por pela inércia da descarga. Já as plumas do Caso 2 ($R_K >> 1$) são descargas de larga escala espacial e têm a dinâmica de dispersão dominada pela rotação planetária, através do efeito de Coriolis. Segundo este autor, casos intermediários, ou seja, plumas com número Kelvin próximo a 1, são dinamicamente mais complexas por apresentarem características de ambos os casos.

Neste trabalho foi calculado o número Kelvin pra as duas situações extremas de formação de plumas encontradas. Dia 15/02/07 durante uma vazante de sizígia e dia 13/02/07 durante uma vazante de quadratura. A tabela 4 mostra os valores de R_K encontrados em comparação aos valores de outras plumas descritas na literatura.

TABELA 4 – NÚMEROS KELVIN DE ALGUMAS PLUMAS

Rio/Estuário	L (km)	D (m)	f (10^{-4} s^{-1})	R_K	Fonte
CEP (Desembocadura Sul)	3.0	10	0.6	0.3	Presente Trabalho (sizígia)
CEP (Desembocadura Sul)	3.0	5	0.6	0.3	Presente Trabalho (quadratura)
Connecticut	1.5	3	1.0	0.2	GARVINE (1974)
Great Whale	1.0	2	1.2	0.2	INGRAN (1981)
Koobana Bay	0.1	2	-0.7	0.0	LUKETINA E IMBERGER (1987)
Columbia	4.0	2	1.0	0.6	JAY E SMITH (1990)
La Grange	5.0	5	1.2	0.6	FREEMAN (1982)
Fraser	2.0	3	1.1	0.4	STRONACH (1977)
Mississippi	0.2	2	0.7	0.0	WRIGHT E COLEMAN (1971)
Chesapeake	20	3	0.9	4.2	BOICOURT (1973)
St. Lawrence	40	20	1.1	5.0	TANG (1980)
Hudson	10	4	1.0	2.0	BOWMAN E IVERSON (1978)

O valor de R_K encontrado para as duas situações de formação de plumas analisadas para a desembocadura sul da baía de Paranaguá indicam que a estas se

enquadram no Caso 1 (GARVINE,1995), com a dinâmica dominada pela inércia da descarga estuarina. Porém, como ressalta O'Donnel (1993), a força dos ventos e marés sobre a pluma podem impor escalas de dispersão que independem do raio de deformação, que é calculado com base em parâmetros obtidos na desembocadura, sendo, portanto o uso do valor de R_k inadequado para a caracterização de toda a pluma. No Rio Mississippi, por exemplo, a descarga e dimensão da pluma variam amplamente, e, apesar do valor de R_k indicar que a rotação não é importante próximo à desembocadura, a pluma se espalha sobre vastas áreas do oceano adjacente. Com isso a rotação da Terra passa a exercer um papel significativo na sua dinâmica.

De fato, em algumas imagens de satélite analisadas (ver secção 5.4) é possível visualizar, durante os eventos em que as plumas são observadas a grande distância da costa, feições de formato anticiclônico. Porém não foi possível determinar se este comportamento foi causado pela ação da força de Coriolis ou somente pelo regime de ventos e correntes da plataforma.

É possível que a aceleração de Coriolis limite a distância em direção ao mar aberto em que a pluma é encontrada. Estudos teóricos e de modelagem indicam que na direção da corrente no ponto de descarga, a pluma alcança uma distância da ordem de duas vezes o raio de deformação Rossby interno (R) (HILL, 1998). O raio de deformação Rossby interno para uma descarga costeira é dado por:

$$R = (g'h)^{1/2} / f \quad (4)$$

onde $g' = g\Delta\rho / \rho$, é a gravidade reduzida, sendo que Δ é a densidade da água ambiente, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre as águas da pluma e da água ambiente, h é profundidade da pluma e f é o parâmetro de Coriolis. Através da Equação 4 foi obtida uma estimativa de R da ordem de 10 km para a pluma do dia 15/02/07 e de 8 km para a pluma do dia 13/03/07. Assim sendo, o alcance da pluma sobre as águas da plataforma, na direção do fluxo principal é de 20 e 16 km respectivamente, para estes dois eventos. Este resultado é muito consistente com os dados obtidos em campo. No dia 15/02/07 em horário equivalente à baixa-mar de sizígia uma frente de superfície foi localizada a 20 km da desembocadura do CEP. Isto também é corroborado pelos valores de nLw555 retirados de dois transectos posicionados sobre uma série temporal de 24 imagens MODIS, que mostram que a influência da turbidez costeira alcança aproximadamente 20 km nos eventos mais

extremos analisados. Os dados obtidos neste trabalho também estão de acordo com trabalhos anteriores desenvolvidos na região. Noernberg (2001) analisando uma imagem obtida após um evento de precipitação localizou esta influência a 25 km da costa. Freitas (2007) analisando uma série de imagens MODIS de três anos encontrou a máxima influência da pluma do CEP sobre a plataforma a 35 km de distância da costa.

A distância de alcance da pluma é dependente da precipitação que é altamente variável, e do regime de ventos. Ambos produzem alterações na distância em direção a mar aberto em que a pluma pode ser encontrada.

A distância a partir da desembocadura que esta pluma é detectada sobre as águas da plataforma está altamente correlacionada com a precipitação dos dias anteriores. As matrizes de correlação analisadas mostraram um coeficiente de correlação de Pearson (r) de 0.95 para a distância da isohalina 31 em superfície a partir da estação T1 em direção ao oceano e a precipitação média entre Pontal do Sul e Antonina nos seis dias anteriores.

Quando os ventos são favoráveis à subsidência, as plumas tendem a aderir à costa em faixas estreitas. Quando os ventos mudam para favoráveis à ressurgência a pluma e sua carga de materiais em suspensão é espalhada no interior da plataforma continental onde é rapidamente misturada com a água da plataforma. Esse comportamento já havia sido descrito na literatura para outras localidades, como a baía Chesapeake e o rio Hudson nos EUA (RENNIE *et al.* 1999; YANKOVSKI *et al.* 2000; JOHNSON, *et al.* 2001, 2003). A escala de tempo da passagem dos sistemas frontais em médias latitudes (em torno de 2 a 6 dias) faz com que o estabelecimento ao longo da costa e a dispersão da pluma sejam um mecanismo extremamente eficiente para a dispersão de materiais continentais e estuarinos na plataforma (JOHNSON *et al.*, 2003). Comportamento similar foi observado para a pluma do CEP. A dispersão da pluma sobre as águas da plataforma é favorecida pela atuação de ventos do quadrante nordeste. A influência da pluma alcançou as maiores distâncias em direção ao mar aberto quando os ventos estavam nesta direção durante a maré vazante e após períodos de precipitação intensa. Esse processo pode ser observado nas imagens de satélite da seção 5.4. Porém, em períodos de persistência de vento sul a pluma permanece junto à costa, em uma faixa estreita, deslocando-se longas distâncias em sentido norte. Não foi possível determinar a distância de influência da pluma nesta situação

devido à contribuição das outras desembocaduras existentes ao norte do CEP, sendo impossível com os métodos utilizados separar a contribuição de cada uma delas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

O fluxo de vazante da Baía de Paranaguá, para a série de dados utilizados, não tem competência para deter a entrada da cunha salina.

Durante as marés de quadratura a pluma comporta-se advectada à superfície. Durante as sizígias a estratificação é menor e a pluma comporta-se como advectada ao fundo, saindo do estuário por toda a coluna d'água.

A estratificação salina média foi maior no verão. O maior aporte de água doce e a intrusão de águas mais salinas pelas camadas de fundo das estações mais distantes da costa, resultou na formação de plumas superficiais bem destacadas. Os maiores gradientes superficiais de salinidade durante o verão também se devem a vazão elevada de água doce e a mistura da pluma com as águas da plataforma.

Apesar da precipitação no inverno ter sido bem menor do que no verão as salinidades são menores, havendo maior quantidade de água doce misturada. Isto se deve à presença de águas de baixa salinidade, oriundas de outras regiões, na plataforma continental paranaense.

Uma influência bem marcada da descarga estuarina foi observada até a estação T5. A partir da estação T6 a influência estuarina restringe-se à camada superficial e a dinâmica da plataforma passa a dominar os processos de mistura. Nas estações mais externas só é encontrada água estuarina após eventos extremos de precipitação.

Ventos do quadrante nordeste realçam progressivamente a estratificação termal e salina. A inversão dos ventos com a passagem dos sistemas frontais pode causar agitação marítima, erodindo a termoclina e misturando a coluna d'água, diminuindo as temperaturas em todo o transecto.

As matrizes de correlação realizadas indicam que a quantidade de água doce presente na região de desembocadura do estuário é resultado da precipitação ocorrida entre cinco e seis dias anteriores nas diferentes bacias que drenam para dentro do CEP. Estando este resultado de acordo com trabalhos anteriores realizados na região. Já a estratificação salina é ressaltada quando a precipitação ocorre nas bacias de drenagem próximas à desembocadura. Nestas condições às

águas de baixa salinidade saem do estuário por uma camada superficial bem destacada. Já a água doce que entra nas regiões mais internas do estuário, distantes da desembocadura, sofre maior ação dos processos de mistura, chegando à desembocadura diluída por toda a coluna d'água.

Através da análise de imagens do sensor MODIS é possível observar que quando os ventos são do quadrante sul a pluma do CEP desloca-se para norte acumulada junto à costa. Quando os ventos são de direção norte e nordeste a pluma espalha-se sobre as águas da plataforma, alcançando as maiores distâncias em direção a mar aberto. Quando a pluma está advectada à superfície, esta atinge maiores distâncias devido à dispersão pelo vento ser mais efetiva quando a pluma está restrita à camada superficial. Quanto menor a diferença de densidade entre a pluma e as águas receptoras, mais intensa é a sua diluição.

A partir dos dados de dois transectos de 72 km cada, posicionados sobre uma série de 24 imagens MODIS para a retirada de valores de nLw555, foi possível verificar que a influência da turbidez costeira chega à aproximadamente 20 km da costa durante os eventos mais extremos de precipitação. Trabalhos anteriores na região estimaram esta influência entre 25 e 35 km da costa.

6.2 ESCALAS TEMPORAIS DOS PROCESSOS

A dinâmica da pluma, sua morfologia e extensão de influência é fortemente dependente das marés, ventos e principalmente da vazão dos rios, (MORRIS et al., 1995), que por sua vez é dependente da precipitação. Esses fenômenos ocorrem em escalas temporais distintas. A seguir é apresentado um agrupamento em função das escalas temporais dos processos.

6.2.1 Variabilidade na escala de horas.

A partir dos dados verticais de salinidade, temperatura e densidade obtidos ao longo do transecto amostral, em dias em que mais de uma saída de campo foi realizada, é possível visualizar mudanças bastante significativas na estrutura hidrográfica em apenas algumas horas, devido à mudança da maré. As duas campanhas realizadas no dia 15/02/07 (FIGURAS 11 E 13) ilustram bem esta

mudança que ocorre em poucas horas. Porém, esta variação é mais intensa nas estações amostrais que se encontram dentro do estuário. Nas estações situadas na plataforma, em especial nas mais distantes da desembocadura, a influência da mudança da maré é praticamente irrelevante. Exceções ocorrem em dias com elevado aporte de água doce, quando a pluma chega a influenciar a salinidade superficial destas estações.

Outro fenômeno observado foi o aquecimento das camadas superficiais pela radiação solar, que segundo Mantovanelli (1999) ocorre mais intensamente entre 12 e 15h.

A análise das imagens de satélite indica que a dispersão horizontal da pluma também está relacionada com o padrão de ventos nas horas anteriores à aquisição das imagens. Apesar de uma análise estatística mais robusta entre essas variáveis não ter sido feita, é possível atribuir as mudanças no deslocamento da pluma à inversão no sentido dos ventos também em escala horária. Segundo Verdier-Bonnet *et al.* (1999), a difusão vertical e horizontal da pluma é fortemente dependente da força do vento, sendo que as interações do vento com a camada superficial (dispersão horizontal) tem sua escala de ação em horas. Já as mudanças causadas pelo vento na estrutura vertical (Ex. fenômenos de ressurgência) ocorrem em uma escala mais ampla, de dias.

6.2.2 Variabilidade na escala de dias

Uma série de fenômenos ocorre nesta escala de tempo. Nesta latitude, talvez o principal evento modificador da dinâmica costeira nesta escala seja a ocorrência de sistemas frontais, que estão associados à trajetória do Anticiclone Migratório Polar, que se propaga em direção N e NE (QUADROS, 2002).

A passagem dos sistemas frontais é responsável por grande parte da precipitação que ocorre na região, que por sua vez influencia a vazão dos rios e modula a quantidade de água doce que sai pela desembocadura do CEP. Foi observado que a precipitação varia bastante em uma escala de dias, sendo que as plumas mais bem destacadas das águas circundantes ocorreram após eventos de precipitação elevada.

Na escala de dias também ocorre uma variação da amplitude da maré entre sizígia e quadratura. Foi observada uma maior estratificação da coluna d'água durante as marés de quadratura, sendo que na maioria dos casos durante a sizígia a coluna d'água encontrava-se bem misturada.

Segundo Marone e Camargo (1994), a passagem de frentes associada aos fortes ventos do quadrante sul também é capaz de influenciar a maré, causando o empilhamento de água na costa caracterizando as marés meteorológicas.

A mudança no padrão de direção ventos, que tem papel determinante na dinâmica da plataforma, ocorre também nesta escala. Foi possível observar que durante a dominância de ventos do quadrante nordeste, causados pela atuação do anticiclone tropical, a coluna d'água sobre a plataforma teve a estratificação realçada pela intrusão de águas mais frias. Essa estratificação foi quebrada após a passagem de sistemas frontais, devido aos ventos de quadrante sul associados, que interrompem o processo de ressurgência e misturam a coluna d'água.

A passagem dos sistemas frontais, portanto, tem papel fundamental na dinâmica da pluma do CEP. A precipitação causada por estes eventos resulta em maior vazão dos rios e por consequência, maior descarga de água doce na plataforma através da pluma. Nas imagens de satélite analisadas é possível observar que durante os ventos do quadrante sul, associados à passagem das frentes, a pluma se desloca para norte em uma faixa estreita junto à costa, com os ventos mudando novamente para nordeste, favoráveis à ressurgência, depois da passagem das frentes, a pluma se dispersa sobre as águas da plataforma, sendo rapidamente misturada. Esse comportamento da pluma em relação à passagem dos sistemas frontais já havia sido descrito para outras localidades (RENNIE *et al.*, 1999; YANKOVSKI *et al.*, 2000; JOHNSON, *et al.*, 2001, 2003). A escala de tempo da passagem dos sistemas frontais em médias latitudes (em torno de 2 a 6 dias) faz com que o estabelecimento ao longo da costa e a dispersão da pluma sejam um mecanismo extremamente eficiente para a dispersão de materiais continentais e estuarinos na plataforma (JOHNSON *et al.*, 2003).

Apesar do regime de ventos apresentar variação em uma escala horas e de dias, essa variação é mais notada em uma escala sazonal como será visto a seguir.

6.2.3 Variabilidade na escala sazonal

A principal causa das mudanças sazonais é a trajetória do sol ao longo do ano. Isso causa uma marcada diferença entre verão e inverno na quantidade de energia que atinge o planeta nas latitudes subtropicais. Uma das consequências observadas foi que durante o inverno, a temperatura média da coluna d'água foi 8.47°C mais baixa do que no verão.

Essa diferença de energia disponível também promove maior evaporação durante os meses de verão, o que ocasiona a formação de nuvens de tempestade resultando nas elevadas precipitações registradas durante esse período. De fato, a formação bem definida da pluma estuarina do CEP sobre as águas da plataforma só foi observada durante as campanhas de verão.

Durante o inverno, a diminuição da energia solar no hemisfério sul enfraquece o anticiclone tropical, favorecendo a atuação dos sistemas frontais que passam mais frequentemente pela latitude do CEP. Isso resulta em maior período de dominância de ventos do quadrante sul. Esse padrão de ventos e a agitação marítima associada ocasionam a diminuição da estratificação salina observada nas águas da plataforma. Durante o verão a estratificação na plataforma adjacente ao CEP é realçada pelos ventos de nordeste favoráveis à ressurgência, que atuam na maior parte do tempo devido à atuação mais intensa do anticiclone tropical, e pelas chuvas intensas, que causam saída da água de baixa salinidade.

Apesar da maior frequência na passagem das frentes durante o inverno, a precipitação causada por estes eventos é muito menor se comparada às tempestades de verão.

Outro fenômeno de escala sazonal observado foi a diminuição da salinidade durante o inverno causada pelo acúmulo de água de baixa salinidade junto à costa e pela presença da Frente Subtropical de Plataforma, formada principalmente pelas águas do Rio da Prata com contribuição de outras águas continentais, como da lagoa dos Patos. Essa frente chega a influenciar a plataforma paranaense devido à persistência dos ventos do quadrante sul. A presença da FSP foi a responsável pelas baixas salinidades observadas durante as campanhas de inverno.

6.2.4 Variabilidade na escala inter-anual

Apesar de este trabalho ter sido desenvolvido somente durante o ano de 2007, é muito provável que por ter sido efetuado em um ano considerado seco em relação à média histórica (CPTEC, 2007), a ocorrência de plumas tenha sido menor do que em anos considerados não-anômalos. De fato um acompanhamento da variabilidade da pluma do CEP em uma série temporal mais longa permitiria entender o que acontece em anos de precipitação elevada, como por exemplo, em anos em que há atuação do fenômeno *El niño*.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um estudo mais detalhado sobre os padrões de dispersão da pluma estuarina do CEP, seria necessário um esforço maior de campo, que pudesse abranger também as outras desembocaduras. É necessário também conhecer quais são as taxas de exportação de material particulado e dissolvido em suspensão, em diferentes condições ambientais assim como a granulometria desse material. A taxa de exportação de nutrientes e poluentes para a plataforma continental adjacente também é pouco conhecida. Devido aos custos elevados das amostragens *in situ*, uma boa opção para o estudo da dispersão da pluma e de seus constituintes seria a utilização de amostragens de campo simultaneamente à aquisição de imagens de satélite. Atualmente as imagens de satélite possuem resolução temporal e espacial adequada e baixos custos para serem utilizadas neste tipo de estudo. Neste trabalho foi possível observar através de imagens do sensor MODIS, alguns padrões de comportamento da pluma, porém não foi possível separar dentre os valores elevados de reflectância, qual a contribuição do material particulado em suspensão, da matéria orgânica dissolvida, e do fitoplâncton, principais compostos responsáveis pela cor do mar observadas nas imagens. Futuramente, a determinação das propriedades ópticas destas substâncias, e sua variabilidade espacial e temporal, podem permitir que se separe, dentre os altos valores de turbidez observados nas imagens de satélite, qual a contribuição de águas que deixam o estuário, da ressuspensão de sedimentos pela ação de ondas e correntes na plataforma e da produção primária oceânica. Em determinadas situações o gradiente salino entre as águas da pluma estuarina e da plataforma é bastante reduzido, sendo difícil a detecção do limite da pluma apenas pela salinidade. A determinação do coeficiente de absorção da luz dos constituintes opticamente ativos, específicos para esta região, pode permitir um acompanhamento mais eficiente do alcance e padrões de dispersão da pluma estuarina do Complexo Estuarino de Paranaguá na plataforma continental.

REFERÊNCIAS

ABREU, P. C.; GRANÉLI, H. W.; ODEBRECHT, C. Produção fitoplanctônica e bacteriana na região da pluma estuarina da lagoa dos patos – RS, Brasil. **Atlântica**. Rio Grande, n. 17, p. 35-52, 1995.

ANGULO, R. J. **Geologia da planície costeira do Estado do Paraná**. 334 f. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

ARMI, L.; FARMER, D. M. Maximal two-layer exchange through a contraction with barotropic net flow. **Journal of Fluid Mechanics**. n. 164, p. 27-51, 1986.

BERNER, E. K.; BERNER, R. A. **The global water Cycle: Geochemistry and Environment**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1996. 397 p.

BIGARELLA, J. J. *et al.* **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: um problema de segurança ambiental e nacional**. Curitiba: Governo do Paraná/SEPL/ADEA, 1978. 249 p.

BOWDEN, K. F. **Physical Oceanography of Coastal Waters**. Ellis Horwood Series in Marine Science. Institute of Oceanographic Sciences. Surrey: Wormley, 1983. 302p.

BOWMAN, M. J.; IVERSON, R. L. Estuarine and plume fronts. In: BOWMAN, M. J.; ESAIAS, W. E. (Ed.). **Oceanic fronts and coastal processes**. Berlin: Springer-Verlag, 1978. p. 87-104.

BRANDINI, F. P. Composição e distribuição do fitoplâncton na região Sueste do Brasil e suas relações com as massas de água (Operação Sueste – julho/agosto 1982). **Ciência e Cultura**. v. 40, n. 4, p. 334-341, 1988.

BRANDINI, F. P. Hydrography and characteristics of the phytoplankton in shelf and oceanic waters off southeastern Brazil during winter (July/August 1982) and summer (February/March 1984). **Hydrobiologia**. n. 196, p. 111-148, 1990.

BRANDINI, F.P *et al.* Sources of Nutrients and Seasonal Dynamics of Chlorophyll in the Inner Shelf off Parana State—South Brazil Bight. **Journal of Coastal Research**. No prelo.

BRITTER, R. E.; SIMPSON, J. E. Experiments on the dynamics of a gravity current head. **Journal of Fluid Mechanics**. n. 88, p. 223-240, 1978.

BROCHE, P. *et al.* Experimental study of the Rhone plume. Part I: physics and dynamics. **Oceanologica Acta**. v. 21, n. 6, p. 725-738, 1998.

CAMARGO, R. **Estudo numérico das circulações atmosférica e oceânica na região da Baía de Paranaguá**. 181 f. Tese (Doutorado) – Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CAMARGO, R.; MARONE, E. Comportamento do vento de superfície em Pontal do Sul (PR, Brasil): análise preliminar. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR, 6, 1995, Mar del Plata. **Resumos...** p. 63-63.

CAMPANER, A. F.; HONDA, S. Distribution and co-occurrence of *Calanodes Carinatus* and larvae of *Sardinella brasiliensis* and *Engraulis anchoita* over Southern Brazilian continental shelf. **Bolm. Inst. Oceanogr.** São Paulo, n. 35, p. 7-16, 1987.

CASTRO, B. M. **Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo.** 248 f. Tese de Livre-docência – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CASTRO, B. M. *et al.* Multidisciplinary oceanographic processes on the western Atlantic continental shelf between 4°N and 34°S (4,W). In: ROBINSON, A. R; BRINK, K. H. **The Sea.** vol. 14. Harvard, 2005. p. 259-293.

CPTEC. **Climanálise.** Centro de Previsão do tempo e estudos climáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 05/11/07.

CRITCHFIELD, H. J. Energy and Temperature. In: CRITCHFIELD, H. J. (Ed.). **General Climatology.** Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1983. p. 14-41.

DNM. Normais climatológicas (1961-1990). Brasília: Ministério da Agricultura e Reforma Agrária - Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. 84p.

DZWONKOWSKI, B.; YAN, X. H. Tracking of a Chesapeake Bay estuarine outflow plume with satellite-based ocean color data. **Continental Shelf Research.** n 25, p. 1942–1958, 2005.

EMILSSON, I. The shelf and coastal waters off southern Brazil. **Boletim do Instituto Oceanográfico.** São Paulo, v. 11, n. 2, p. 101-112, 1961.

FELDMAN, G. C.; MCCLAIN, C.R. **Ocean Color Forum.** Eds. KURING, N.; BAILEY, S. W.; THOMAS, D.; FRANZ, B. F.; MEISTER, G.; WERDELL, P. J.; EPLEE, R. E.; MACDONALD, M.; RUBENS, M. NASA Goddard Space Flight Center, 2005. Disponível em: < <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 12/09/07.

FICHEZ, R.; JICKELLS, T. D.; EDMUNDS, H. M. Algal blooms in high turbidity, a result of the conflicting consequences of turbulence on nutrient cycling in a shallow water estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science.** n. 35, p. 577-593, 1992.

FREEMAN, N. G. S. **Measurement and modeling of fresh water plumes under an ice cover.** 155 f. Ph.D. Dissertation – University of Waterloo, Burlington, Ontario, Canada, 1982.

FREITAS, F. H. **Fontes e variabilidade da turbidez costeira: o sensor MODIS como ferramenta.** 83 f. Monografia (Graduação em Oceanografia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Pontal do Paraná, 2007.

FROIDEFONDE, J. *et al.* Variabilité du panade turbide de la Gironde par télédétection. Effets des facteurs climatiques. **Oceanologica Acta**. v. 21, n. 2, p. 191-207, 1998.

GARVINE, R. W. A dynamical system for classifying buoyant coastal discharges. **Continental Shelf Research**. n. 15, p. 1585-1600, 1995.

GARVINE, R. W. Estuary plumes and fronts in shelf waters: a layer model. **Journal of Physical Oceanography**. n. 17. p. 1877-1896, 1987.

GARVINE, R. W. Physical features of the Connecticut river outflow during high discharge. **Journal of Geophysical Research**. n. 79, p. 831-846, 1974.

GARVINE, R. W. Radial spreading of buoyant, surface plumes in coastal waters. **Journal of Geophysical Research**. n. 89, p. 1989-1996.

GEYER, W. R. *et al.* The structure of the Eel River plume during floods. **Continental Shelf Research**. n. 20, p. 2067-2093, 2000.

GEYER, W. R. *et al.* The physical oceanography of the amazon outflow. **Journal of Physical Oceanography**. n. 19, p. 1060-1072, 1991.

GEYER, W. R.; FARMER, D. M. Tide induced variation of the dynamics of a salt wedge estuary. **Journal of Physical Oceanography**. n. 28, p. 1060-1072, 1989.

GEYER, W. R.; HILL, P. S.; KINEKE, G. C. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. **Continental Shelf Research**. n. 24, p. 927-949, 2004.

GEYER, W. R.; KINEKE, G. C. Observations of currents and water properties in the Amazon frontal zone. **Journal of Geophysical Research**. n. 100, p. 2321-2339, 1995.

GFSC / DAAC / NASA. **MODIS-Terra Product Descriptions**. Disponível em: <http://daac.gsfc.nasa.gov/MODIS/Terra/product_descriptions_Modis.shtml>. Acesso em: 22/09/07.

GIBBS, R. J. Circulation in the Amazon River estuary and adjacent Atlantic Ocean. **Journal of Marine Research**. n. 28, p. 113-123, 1970.

GOOGLE MAPS. **Mapa composto a partir de imagens de satélite da região sul-sudeste do Brasil**. Google, 2008. Escala variável. Disponível em: <<http://www.maps.google.com>>. Acesso em: 15/01/2008.

GORDON, H. R.; MOREL, A. A remote assessment of ocean colour for interpretation of satellite visible imagery: a review. In: **Lecture notes on coastal and estuarine studies**. New York: Springer-Verlag, 1983.

GRUPO DE FÍSICA MARINHA. **Registro das condições atmosféricas efetuadas pela estação meteorológica do Centro de Estudos do Mar da UFPR, para o ano de 2007**. Pontal do Paraná, 15 out. 2007. Banco de dados digital.

GUO, X.; VALLE-LEVINSON, A. Tidal effects on estuarine circulation and outflow plume in the Chesapeake Bay. **Continental Shelf Research**. n. 27, p. 20-42, 2007.

HELLWEGER, F.L.; SCHLOSSER, P.; LALL, U.; WEISSEL J.K. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. n. 61, p. 437-448, 2004.

HICKEY, B. *et al.* A bi-directional river plume: The Columbia in summer. **Continental Shelf Research**. n. 25, p. 1631-1656, 2005.

HOEKSTRA, P. Buoyant river plumes and mud deposition in a rapidly extending tropical delta. **Netherlands Journal of Sea Research**. v. 23, n. 49, p. 517-527, 1989.

HOYAL, D. J. D.; BURSİK, M. I.; ATKINSON, J. F. The influence of diffusive convection on sedimentation from buoyant plumes. **Marine Geology**. n. 159, p. 205-220, 1999.

IAPAR. **Registro pluviométrico da estação meteorológica de Guaraqueçaba para o ano de 2007**. Curitiba, 18 out. 2007. Banco de dados digital.

INGRAM, G. Characteristics of the Great Whale River plume. **Journal of Geophysical Research**. n. 86, p. 2017-2023, 1981.

IOCCG. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters. In: SATHYENDRANATH, S. (Ed.). **Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group No. 3**. Dartmouth: IOCCG, 2000. p. 6-20.

IPARDES. Diagnóstico físico ambiental da Serra do Mar - área sul. Vol. 02. Curitiba, 1991.

JAY, D. A.; SMITH, J. D. Residual circulation in shallow estuaries 1. Highly stratified, narrow estuaries. **Journal of Geophysical Research**. n. 95, p. 711-731, 1990.

JOHNSON, D. R.; MILLER, J.; SCHOFIELD, O. Dynamics and optics of the Hudson River outflow plume. **Journal of Geophysical Research**. n. 108, p. 10211-10219, 2003.

JOHNSON, D. R.; WEIDEMANN, A.; ARNONE, R.; DAVIS, C. O. Chesapeake Bay outflow plume and coastal upwelling events: Physical and optical properties. **Journal of Geophysical Research**. n. 106, p. 11613 -11622, 2001.

JOUANNEAU, J. M.; LATOUCHE, C. Estimation of fluxes to the ocean from mega-tidal estuaries under moderate climates and problems they present. **Hydrobiologia**. n. 91, p. 23-29, 1982.

KAMPEL, M.; NOVO, E. M. L. M. O sensoriamento remoto da cor da água. In: SOUZA, R. B. (Ed.). **Oceanografia por satélites**. São Paulo: Oficina de textos, 2005. p. 179-196.

KIRINCICH, A. R.; HEBERT, D. The structure of the coastal density front at the outflow of Long Island sound during spring 2002. **Continental Shelf Research**. n. 25, p. 1097-1114, 2005.

KRAUSE, G. *et al.* Frontal systems in the German Bight and their physical and biological effects. **Marine Interfaces Ecohydrodynamics**. v. 42, n. 1, p. 119-141, 1986.

KURTZ, F. W.; MATSUURA, Y. Food and feeding ecology of Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*) larvae from the southeastern Brazilian Bight. **Revista Brasileira de Oceanografia**. n. 49, v. 1/2, p. 61-74, 2001.

LAGERLOEF, G. S. E. Recent progress toward satellite measurements of the global sea surface salinity field. In: HALPERN, D. (Ed.). **Satellites, Oceanography and Society**. Amsterdam: Elsevier, 2000. p. 309-319.

LAMOUR, M. R. **Morfodinâmica sedimentar da desembocadura do complexo estuarino de Paranaguá – PR**. 177 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. 2000. The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: SEELIGER, U.; LACERDA, L. D.; KJERFVE, B. (Ed.). **Coastal Marine Ecosystems of Latin America**. Berlin: Springer-Verlag, 2000. p. 131-145.

LI, R. R.; KAUFMAN, Y. J.; GAO, B. C.; DAVIS, C. O. Remote Sensing of Suspended Sediments and Shallow Coastal Waters. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. vol. 41, n. 3, p. 559-566, 2003.

LUKETINA, D. A.; IMBERGER, J. Characteristics of a surface buoyant jet. **Journal of Geophysical Research**. n. 92, p. 5435-5447, 1987.

MANN, K. H.; LAZIER, J. R. N. **Dynamics of marine ecosystems**. London: Blackwell Science, 1996. 393 p.

MANN, K. H.; LAZIER, J. R. N. **Dynamics of marine ecosystems: biological-physical interactions in the ocean**. Cambridge: Blackwell Scientific Publications, 1991. 466 p.

MANTOVANELLI, A. **Caracterização da dinâmica hídrica e do material particulado em suspensão na Baía de Paranaguá e em sua bacia de drenagem**. 149 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.

MARONE, E. *et al.* Land-ocean fluxes in the Paranaguá bay estuarine system, southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**. n. 53, p. 169-181, 2005.

MARONE, E.; CAMARGO, R. Marés meteorológicas no litoral do Estado do Paraná: o evento de 18 de agosto de 1993. **Nerítica**. Curitiba, n. 8, p. 73-85, 1994.

MARONE, E.; JAMIYANAA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. **Nerítica**. Curitiba, n. 11, p. 95-107, 1997.

MARONE, E.; MANTOVANELLI, A.; NOERNBERG, M. A.; KLINGENFUSS, M. S.; LAUTERT, L. F. C.; PRATA JUNIOR, V. P. **Caracterização física do complexo estuarino da Baía de Paranaguá** -Relatório consolidado do convênio APPA/CEM. Pontal do Paraná: UFPR. v. 2. 1997.

MARTIN, F. **Etude de l'écosysteme mangrove de la baie de Paranaguá (Paraná, Brésil):** analyse des impacts et propositions de gestion rationnelle. 289 f. These de Doctorat – UFR de Biologie, Université de Paris, Paris, 1992.

MATSUURA, Y. A probable cause of recruitment failure of the Brazilian sardine *Sardinella aurita* population during the 1974/75 spawning season. **S. Afr. J. Mar. Sci.** n. 17, p. 29-35, 1996.

MATSUURA, Y. Contribuição ao estudo da estrutura oceanográfica da região sudeste entre Cabo Frio (RJ) e Cabo de Santa Marta Grande (SC). **Ciência e Cultura**. n. 38, p. 1439-1450, 1986.

MATSUURA, Y. Distribution and abundance of skipjack (*Katsuwonus pelamis*) larvae in eastern Brazilian waters. **Bolm. Inst. Oceanogr.** São Paulo, v. 31, n. 2, p. 5-7, 1982.

MATSUURA, Y. Fluctuation of sardine catch in the southwestern Brazilian waters and some comments on an influence of the oceanographic conditions on sardine spawning. **Bull. Japan. Soc. Fish. Oceanogr.** n. 55, p. 80-82, 1991.

MERTES, L. A. K. *et al.* Synoptic views of sediment plumes and coastal geography of the Santa Barbara Channel, California. **Hydrological Processes**. n. 12, p. 967–979. 1998.

MERTES, L. A. K.; WARRICK, J. A. Measuring flood output from 110 coastal watersheds in California with field measurements and SeaWiFS. **Geology**. n. 29, p. 659–662, 2001.

MIHÁLY, P.; ANGULO, R. J. Dinâmica da desembocadura do corpo lagunar do Ararapira. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 2 n. 32, p. 217-222, 2002.

MILLER, R. L.; McKEE, B. A. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. **Remote Sensing of Environment**. n. 93, p. 259-266, 2004.

MIRANDA, L. B. **Análise de massas de água da plataforma continental e da região oceânica adjacente: Cabo de São Tomé (RJ) a Ilha de São Sebastião (SP)**. 238 f. Tese de Livre-docência – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1982.

MOREHEAD, M. D.; SYVITSKI, J. P. River plume sedimentation modeling for sequence stratigraphy: application to the Eel margin northern California. **Marine Geology**. n. 154, p. 29-41, 1999.

MOREL, A.; PRIEUR, L. Analysis of variations in ocean color. **Limnology and Oceanography**. n. 22, p. 709-722, 1977.

MORRIS, A. W.; ALLEN, J. I.; HOWLAND, R. J. M.; WOOD, R. G. The Estuary Plume Zone: source or sink for land-derived nutrient discharges? **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. n. 40, p. 387-402, 1995.

MULLER-KARGER, F. E.; RICHARDSON, P. L.; MCGILLICUDY, D. On the offshore dispersal of the Amazon's Plume in the North Atlantic. **Deep Sea Research**. n. 42, p. 2127-2137, 1995.

NATIVIDADE, C. D. **Estrutura populacional e distribuição do camarão sete-barbas *Xiphopenaeus kroyeri* (HELLER, 1862) (Decapoda: penaeidae) no litoral do Paraná, Brasil**. 93 f. Dissertação (Mestrado em ecologia e conservação) – Setor de ciências biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

NEZLIN, N. P.; DIGIACOMO, P. M. Satellite ocean color observations of stormwater runoff plumes along the San Pedro Shelf (southern Califórnia) during 1997-2003. **Continental Shelf Research**. n. 25, p. 1692-1711, 2005.

NOERNBERG, M. A. *et al.* Remote Sensing and GIS Integration for Modelling the Paranaguá Estuarine Complex – Brazil. **Journal of Coastal Research**. No prelo.

NOERNBERG, M. A. **Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná - Brasil: um estudo a partir de dados *in situ* e Landsat-TM**. 142 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

O'DONNELL, J. A numerical technique to incorporate frontal boundaries in layer models of ocean dynamics. **Journal of Physical Oceanography**. n. 18, p. 1584-1600, 1988.

O'DONNELL, J. Surface fronts in estuaries: a review. **Estuaries**. v.16, n. 1, p. 12-39, 1993.

O'DONNELL, J. The formation and fate of a river plume: A numerical model. **Journal of Physical Oceanography**. n. 20, p.551-559, 1990.

OFFICER, C. **Physical oceanography of estuaries**. New York: John Willey & Sons, 1975. 465 p.

OLSON, D. B. *et al.* Life on the edge: marine life and fronts. **Oceanography**. v. 7, n. 2, p. 52-60, 1994.

PARANAGUÁ PILOTS. **Registro maregráfico da estação Ilha do Mel para o ano de 2007**. Paranaguá, 20 out. 2007. Banco de dados digital.

PIOLA, A. R. *et al.* The subtropical shelf front off eastern South America. **Journal of Geophysical Research**. n.105, p. 6565–6578, 2000.

PIOLA, A. R.; MÖLLER JR, O. O.; PALMA, E. D. O impacto do Rio da Prata no Oceano Atlântico. **Revista Ciência Hoje**. v. 36, n. 216, p. 30-37, 2005.

POULOS, S. E.; COLLINS, M. B. Effluent diffusion and sediment dispersion at microtidal river mouths, predicted using mathematical models. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. n. 38, p. 189-206, 1994.

PRITCHARD, M.; HUNTLEY, D. A. Instability and mixing in a small estuarine plume front. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. n. 55, p. 275-285, 2002.

QUADROS, C. J. L. **Morfodinâmica praial associada a passagens de sistemas frontais em duas praias arenosas do litoral paranaense**. 57 f. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

RENNIE, S. E.; LARGIER, J. L.; LENTZ, S. J. Observations of a pulsed buoyancy current downstream of Chesapeake Bay. **Journal of Geophysical Research**. n. 104, p. 18227-18240, 1999.

SANTOS, I.; GOMES, J. Caracterização do índice de erosividade da porção oriental do estado do Paraná. In: ANAIS DO VI SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 6, 1998, Presidente Prudente, **Anais...** Presidente Prudente: Associação Brasileira de Geologia e Engenharia. p. 10-10.

SATHYENDRANATH, S.; MOREL, A. Light emerging from the sea – interpretation and uses in remote sensing. In: CRACKNELL, A. P. (Ed.). **Remote sensing applications in marine science and technology**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1983.

SAVTCHENKO, A.; OUZOUNOV, D.; AHMAD, S.; ACKER, J.; LEPTOUKH, G.; KOZIANA, J.; NICKLESS, D. Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC. **Advances in Space Research**. n. 34, p.710–714, 2004.

SCHETTINI, C. A. F. *et al.* Oceanographic and ecological aspects of the Itajaí-açu River plume during a high discharge period. **An. Acad. Bras. Ci.** v. 70, n. 2, p. 335-351, 1998.

SCHUBEL, J. R. Distribution and transportation of suspended sediment in Upper Chesapeake Bay. **The Geological Society of America**. n. 133, p. 151-167, 1972.

SIMEPAR. **Registro pluviométrico da estação meteorológica de Antonina para o ano de 2007**. Curitiba, 15 out. 2007. Banco de dados digital.

SIMPSON, J. E.; BRITTER, R. E. A laboratory model of an atmospheric meso-front. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. n. 106, p. 485-500, 1980.

SIMPSON, J. E.; BRITTER, R. E. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. **Journal of Fluid Mechanics**. n. 94, p 447-495, 1979.

SIMPSON, J. H.; JAMES, I. D. Coastal and estuarine fronts. In: MOOERS, C. N. K. (Ed.). **Baroclinic Processes on Continental Shelves**. Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1986.

SOARES, C. R.; ANGULO, R. J.; LESSA, G. C. VI Congresso da Associação Brasileira de estudos do quaternário (ABEQUA) e reunião sobre o quaternário da América do Sul. **Publicação especial número 2 – Roteiro da excursão ao litoral do estado do Paraná: morfodinâmica de ambientes atuais, evolução da planície durante o quaternário e problemas de erosão costeira**. Curitiba: ABEQUA, 125 p.

SOARES, I. D. The **Southern Brazilian Shelf buoyancy-driven currents**. 318 f. Ph.D. Dissertation – University of Miami, Miami, 2003.

STRONACH, J. A.. **Observations and modeling studies of the Fraser River plume**. 242 f. Ph.D. Dissertation - University of British Columbia, Vancouver, British Columbia, Canada, 1977.

STUMPF, R. P. Sediment transport in Chesapeake Bay during floods: analysis using satellite and surface observations. **Journal of Coastal Research**. v. 4, n. 1, p. 1-15, 1988.

SUDERHSA. **Atlas de Recursos Hídricos do Estado do Paraná**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Curitiba, 1998.

TANG, C. L. Mixing and circulation in the northwestern Gulf of St. Lawrence: A study of a buoyancy-driven coastal current system. **Journal of Geophysical Research**. n. 85, p. 2787-2796, 1980.

VEIGA, F. A. **Processos Morfodinâmicos e Sedimentológicos na Plataforma Continental Rasa Paranaense**. 193 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

VEIGA, F. A.; ANGULO, R. J.; MARONE, E.; BRANDINI, F. P.; CARRILHO, J. C. Medidas de Velocidade de Corrente e Vazão na Plataforma Continental Interna Paranaense Utilizando Perfilador de Corrente Acústico Doppler – ADCP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9, 2003, Recife. **Resumos...**

VERDIER-BONNET, C.; ANGOT, P.; FRAUNILE, P.; COANTIC, M. Three dimensional modelling of coastal circulations with different K-Epsilon closures. **Journal of Marine Systems**. n. 21, p. 321–339, 1999.

WISEMAN, W. J.; GARVINE, R. W. Plumes and coastal currents near large river mouths. **Estuaries**. n. 18, p. 509-517, 1995.

WRIGHT, L. D. Hydrography of South Pass, Mississippi River. J. Waterways, Harbours and Coastal Eng. Div.. **Proc. Am. Soc. Civil Engineers**. v. 97, n. 3, p. 491-504, 1971.

WRIGHT, L. D.; COLEMAN, J. M. Effluent expansion and interfacial mixing in the presence of a salt wedge, Mississippi River Delta. **Journal of Geophysical Research**. n. 76, p.8649-8661, 1971.

YANKOVSKY, A. E.; CHAPMAN, D. C. A simple theory for the fate of buoyant coastal discharge. **Journal of Physical Oceanography**. n. 27, p. 1386-1401, 1997.

YANKOVSKY, A. E.; GARVINE, R. W.; MUNCHOW, A. Mesoscale currents on the inner New Jersey shelf driven by interaction of buoyancy and wind forcing. **Journal of Geophysical Research**. n. 105, p. 2214-2230, 2000.